Über die Leitung elektrischer Ströme im Wismutdraht.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen Philosophischen Fakultät

der

ACAD
LAND.BAT.
BIBL.

Universität Leipzig

vorgelegt von

Richard Seidler

aus **Bautzen.**

Weida i. Th.
Druck von Thomas & Hubert
Spezialdruckerei für Dissertationen
1909.

Angenommen von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Sektion auf Grund der Gutachten der Herren

Des Coudres und Wiener.

Leipzig, den 26. Juni 1909.

Der Procancellar.

Köster.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

I. Einleitung: Geschichtliches 5
II. Allgemeines über Versuchsanordnung und Apparate 15
III. Wiederholung der Pallme-Königschen Versuche 20
IV. Untersuchung des Wismuts auf eine elektrische Nachwirkung . 25
1. Untersuchungsmethode 25
2. Diskussion und Eichung der Versuchsanordnung 27
3. Feststellung der Nachwirkung (und Einfluß der Größe der Meßkapazität) 32
4. Abhängigkeit der Nachwirkung vom Strom (Stromstärke — Stromänderungsgeschwindigkeit) 39
5. Verteilung des Effektes im Drahte (Löfstellen — Drahtlänge — Querschnitt) 45
6. Abhängigkeit von der Struktur 49
a) Gepreßte Drähte (Preßtemperatur — Draht aus Pulver — Umwandelung des Drahtes durch Erwärmen) 49
b) Wismut in Glaskapillaren (und Einfluß äußeren Druckes) . 55
c) Wismut in Glas ausgezogen 59
d) Flüssiges Wismut 60
e) Einfluß der Richtung der Kristallachsen 64
7. Einfluß der Temperatur (Gepreßte Drähte — Wismut in Glashülle) 66
8. Einfluß eines zwischen Stromausschalten und Messung liegenden Kurzschlusses (Abklingung nach dem Kurzschluß — Spannungsanstieg nach dem Kurzschluß) 74
9. Einfluß des Magnetfeldes 82
a) Kraftlinien parallel der Stromrichtung 84
b) Kraftlinien senkrecht zur Stromrichtung 89
V. Versuch eines theoretischen Zusammenschlusses der Beobachtungsergebnisse 101

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546827_0086

I. Einleitung.

Bei Versuchen, welche Lenard[1]) über die durch den Einfluß eines Magnetfeldes an Wismutdraht hervorgebrachte Widerstandsänderung vornahm, machte er die Wahrnehmung, daß Wismut verschiedenes Leitvermögen zeigte, je nachdem die Widerstandsbestimmung mit Gleichstrom oder mit Wechselstrom ausgeführt wurde. Mit den Herren Howard und Catschpol untersuchte er dies auffallende Verhalten des Wismuts eingehender, und er gibt als Ergebnis der Beobachtungen an: der Widerstand von Wismutdraht ist für 300 elektrische Oszillationen in der Sekunde derselbe wie für konstante Ströme, für Perioden von der Ordnung 10000 in der Sekunde jedoch ein anderer. Der letztere Widerstand ist außer Magnetfeld — und im Magnetfeld parallel den Kraftlinien — kleiner als der für konstante Ströme, senkrecht aber zu den Kraftlinien, in Feldern stärker als 6000 CGS, ist er größer.

Diese durch keine bisher bekannten Tatsachen erklärbare Erscheinung hatte Lenard an Wismutdrähten beobachtet, welche von ihm selbst angefertigt worden waren. Es machte sich nun Gg. H. Zahn[2]) daran, eine von Hartmann und Braun gelieferte Magnetfeldmeßspirale aus Wismut zu untersuchen: er fand an dieser die Beobachtungen Lenards bestätigt.

Um einen tieferen Einblick in die Vorgänge im Wismutdraht zu erhalten, war es notwendig, den verwickelten Wechselstromvorgang nicht als Ganzes zu betrachten, sondern ihn in seine Einzelheiten zu zerlegen. Den ersten Schritt auf diesem

---

[1]) Lenard, Wied. Ann. **39**, p. 619, 1890; Lenard u. Howard elektrotechn. Zeitschr. **9**, p. 340, 1888.

[2]) Gg. H. Zahn, Wied. Ann. **42**, p. 351, 1891.

Wege tat Sadowsky.[1]) Dieser löste den Wechselstrom auf in 3 Teile: in ansteigenden Strom, in beinahe konstanten Strom und in abnehmenden Strom. Mit Hilfe einer in Segmente geteilten Scheibe aus Metall mit Schleifkontakt, die an der Achse der kleinen Dynamomaschine befestigt war, welche den Wechselstrom (4—6 Wechsel i. d. Sek.) für die Untersuchungen lieferte, war es möglich, den Galvanometerzweig der Brückenanordnung nur geschlossen zu halten, wenn z. B. der Strom anstieg, bei anderen Versuchen, wenn er gerade das Maximum erreicht hatte, bei noch anderen, wenn er wieder abnahm. Befand sich der Wismutdraht, eine Spirale von Hartmann und Braun, im Magnetfeld, so wurde der Widerstand für ansteigenden Strom größer gefunden als der für den Strom im Maximum seiner Intensität, und dieser Widerstand wieder größer als der bei abfallendem Strom. Außerhalb des Magnetfeldes zeigte das Wismut bei dieser Beobachtungsmethode keine Widerstandsänderung. Benutzte man aber als Stromquelle ein Induktorium mit Zahnradunterbrecher und als Nullinstrument ein Telephon, so zeigte sich auch außerhalb des Magnetfeldes eine Widerstandsdifferenz; der Widerstand verkleinerte sich um 0,12 % bis 0,27 %, wenn die Frequenzen von 92 auf 2088 in der Sekunde stiegen. Außerdem stellte Sadowsky noch fest, daß ein Überlagern von Gleichstrom über den Wechselstrom den Wechselstromeffekt im Felde verminderte.

Fast zur selben Zeit wie Sadowsky untersuchte Griffith[2]) den Wechselstrom-Gleichstromeffekt am Wismut; er beschränkte sich aber auf den Effekt im Magnetfelde. Den experimentellen Teil seiner Arbeit kann man in 2 Teile scheiden. Zunächst untersucht er den Widerstand des Wismuts mit Hilfe der Wheatstoneschen Brücke mit variablen Selbstinduktionszweigen und Telephon und sucht eine Abhängigkeit der Widerstandsänderung von der Schwingungszahl des Wechselstromes. Er kann aber keinen Einfluß der Wechselzahl zwischen

[1]) A. Sadowsky, Phil. Mag. (5) **39**, p. 377, 1895; J. de la Soc. Phys. Chym. Russe **26**, p. 81, 1894; Beiblätter **20**, p. 139.

[2]) A. Griffith, Phil. Mag. (5) **39**, p. 229, 1895.

60—500 Frequenzen finden. Dagegen erkennt er, daß sich der Wismutdraht im magnetischen Feld wohl ähnlich einem Draht mit Selbstinduktion verhält, daß aber der Wismuteffekt keineswegs durch eine Selbstinduktion zu ersetzen ist, denn er kann in der Brücke nie durch eine solche kompensiert werden. Dieser Gedanke findet sich, allerdings etwas unbestimmter, bereis bei Sadowsky ausgesprochen. Im zweiten Teile seiner Arbeit verfolgte Griffith die Widerstandsänderung des Wismuts genauer. Er wandte in ähnlicher Weise wie Sadowsky einen rotierenden Kontakt an, der den Galvanometerzweig der Brückenanordnung in beliebig gewählter Phase zu dem in die Brücke gesandten Wechselstrom schloß. So konnte er punktweise die Kurve aufnehmen, welche die Abhängigkeit der Widerstandsänderung von der Phase des Wechselstromes angibt. Leider hat er diese Untersuchungen nicht weitergeführt, sondern er begnügt sich damit, eine Tabelle für die obengenannte Kurve anzugeben, und er bemerkt dazu, daß die Beobachtungsergebnisse seinen theoretischen Erwägungen widersprechen. Dies mußte aber auch der Fall sein, denn er setzt die elektromotorische Gegenkraft um $\frac{\pi}{4}$ versetzt gegen den eingeprägten Wechselstrom anstatt um $\frac{\pi}{2}$.

In den bisher erwähnten Arbeiten war der Wechselstrom-Gleichstromeffekt nur in seiner Abhängigkeit vom eingeprägten Strom und vom Magnetfeld untersucht worden. Wolff[1]) unterzog sich nun der Aufgabe, auch andere, äußere Umstände mit in Rechenschaft zu ziehen. Da er von Griffiths Arbeit nichts wußte und die Sadowskys nur im Referat kennen gelernt hatte, ist es leicht verständlich, daß er als Versuchsanordnung wieder die Brücke mit variablen Selbstinduktionszweigen wählte und den Zweig des Nullinstrumentes dauernd geschlossen hielt. Letzteres war ein optisches Telephon nach M. Wien; als Stromquelle diente ein Induktorium mit Saitenunterbrecher. Es ließ sich erwarten, daß, da er den Effekt als ein Ganzes untersuchte, verhältnismäßig unübersichtliche Ergebnisse sich heraus-

[1]) Bernhard Wolff, Dissertation, Würzburg 1897.

stellen mußten. Das Wichtigste läßt sich ungefähr folgendermaßen zusammenfassen: Außerhalb des Magnetfeldes und im schwachen Magnetfeld verhält sich Wismutdraht wie ein Widerstand mit parallel geschalteter Kapazität, im starken Feld wie ein Widerstand mit Selbstinduktion. Alle 3 Größen, Widerstand, Kapazität und Selbstinduktion sind von der Schwingungszahl des Wechselstromes und der Stärke des Magnetfeldes abhängig. Struktur und Querschnitt sind von Einfluß auf den Effekt. Außerhalb des Magnetfeldes ließ sich keine Einwirkung der Temperatur zwischen 0° und 40° nachweisen. Im starken magnetischen Feld hatte eine Erhöhung der Temperatur eine Verminderung der Differenz zwischen Wechselstromwiderstand und Gleichstromwiderstand zur Folge. Schließlich konnte noch gezeigt werden, daß der Effekt sich über die ganze Länge des Drahtes ausbreitet, und seinen Sitz nicht etwa nur an den Drahtenden hat.

Da die Verschiedenheit des Widerstandes gegen Wechselstrom und gegen Gleichstrom nur bei Wismut-, Antimon-[1]) und Tellurdrähten[1]) nachgewiesen worden war, lag die Vermutung nahe, daß die Widerstandsänderung bei veränderlichen Strömen mit den magnetischen Eigenschaften der genannten Metalle zusammenhinge. Wachsmuth und Bamberger[2]) untersuchten daher außer den oben genannten Metallen auch das paramagnetische Eisen und Nickel und das magnetisch indifferente Kupfer. Es zeigte sich aber, daß bei den letzten 3 Metallen die Leitfähigkeit für konstante Ströme sich von der für veränderliche nicht unterschied. Am Wismut fand man bestätigt, daß außerhalb des Feldes Wechselstrom geringeren Widerstand findet als Gleichstrom. Erhöhung der Schwingungszahl bewirkte seltsamerweise Vergrößerung des Widerstandes. Im magnetischen Felde über 4200 CGS ergaben die Versuche den Wechselstromwiderstand höher als den für Gleichstrom. Hier hatte die Frequenz des eingeprägten Stromes keinen Einfluß.

[1]) Lenard, l. c.

[2]) R. Wachsmuth und K. Bamberger, Phys. Zeitschr. 1, p. 127, 1899; K. Bamberger, Dissertation, Rostock, 1901.

Antimon zeigte sowohl außerhalb wie innerhalb des Feldes gegen Wechselstrom größeres Leitvermögen als gegen konstante Ströme. Als Versuchsanordnung hatte bei diesen Untersuchungen die Brücke mit Telephon gedient, welche mittelst eines Induktoriums oder einer kleinen Dynamomaschine mit Wechselstrom beschickt wurde. Der Wismutdraht wurde in Gestalt einer Hartmann-Braunschen Spirale untersucht, während Antimon durch Ausziehen des geschmolzenen Metalls in einer Glasröhre in Drahtform gebracht worden war.

In keinem Punkte weichen die bisher erwähnten Arbeiten so voneinander ab, als in den Ergebnissen über den Einfluß der Schwingungszahl des eingeprägten Wechselstromes. Das veranlaßte Simpson,[1]) ausführlichere Untersuchungen in dieser Hinsicht vorzunehmen. Er wählte die Versuchsanordnung Sadowskys und Griffiths, bei welcher durch einen Momentankontakt der Galvanometerzweig der Brückenanordnung stets nur an dem gleichen Punkte in jeder Wechselstromperiode geschlossen gehalten wurde. Durch Verstellen des Momentankontaktes konnte man nun diesen Augenblick, in welchem die Messung vor sich ging, in beliebige Phase zum eingeprägten Wechselstrom verlegen. Die Spannungen, welche infolge der Widerstandsänderung des Wismuts einen Strom im Galvanometerzweig hervorriefen, kompensierte Simpson durch entgegengeschaltete elektromotorische Kräfte und benutzte diese letzteren als Maß für die Widerstandsänderungen. Wie Sadowsky und Griffith konnte er mit dieser Methode nur den Effekt im Magnetfelde beobachten, da außerhalb des Feldes Unterschiede gerade nur noch wahrnehmbar waren. Er fand so für die Widerstandsänderung eine Kurve, welche der Kurve des eingeprägten Stromes ähnlich, aber gegen sie um einen Phasenwinkel nach rückwärts verschoben war. Dieser Phasenwinkel nun war abhängig von der Schwingungszahl; er stieg mit der Frequenz nach einem der $(1-e^{-x})$-Funktion ähnlichen Gesetz. Auch der Betrag der Widerstandsänderung nahm mit zu-

[1]) G. C. Simpson, Phil. Mag. (6), **2**, p. 300, 1901.

nehmender Wechselzahl zu. Die beiden letzten Ergebnisse fand Simpson mittelst folgender Methode: In der Brücke schaffte er eine kleine Unsymmetrie der Widerstände. Es traten dann im allgemeinen 2 Wechselstromkomponenten durch das Galvanometer, von denen eine von der erwähnten Unsymmetrie herrührte und stets in Phase mit dem eingeprägten Strome blieb, während die andere von der Widerstandsänderung im Wismut hervorgebracht wurde und um den aufzusuchenden Betrag dem eingeprägten Strome nachfolgte. Beide Komponenten addierten sich zu einem neuen Wechselstrom, und dieser wurde durch einen auf der Achse der stromliefernden Dynamo befestigten Stromwender so kommutiert, daß das Galvanometer in Ruhe blieb. Es ergaben sich dann aus dem Winkel zwischen eingeprägtem Strom und Kommutation die beiden oben angeführten Tatsachen. Wie bereits Pallme-König in seiner später zu erwähnenden Arbeit zeigt, begeht nun Simpson einen Fehler, indem er meint, die Kommutation müsse dann erfolgen, wenn der Strom im Galvanometerzweig durch Null geht. Doch legen die Versuchsergebnisse nahe, daß dieser Fehler sich durch falsche Winkelablesungen bei den Beobachtungen wieder aufgehoben hat.

In einer zweiten Arbeit,[1]) in welcher die Untersuchungsmethode dieselbe geblieben ist, stellt Simpson weiterhin noch fest: der Betrag der Wiederstandsänderung ist eine lineare direkte Funktion der Feldstärke und wird im Feld 4500 CGS zu Null. Der Temperatureinfluß macht sich in der Weise geltend, daß bei -80^0 der Effekt ein nach beiden Seiten stark abfallendes Maximum hat, wenn man ihn als Funktion der Temperatur darstellt. Der Phasenwinkel aber wurde unabhängig von Magnetfeld und Temperatur gefunden. Die Feldstärken steigerte Simpson bei seinen Untersuchungen bis 10000 CGS; die Temperaturversuche wurden vorgenommen bei -185^0, -70^0, -40^0, 0, $+17^0$, $+43^0$, $+68^0$, $+100^0$. Das untersuchte Wismut war eine Hartmann und Braunsche Spirale; nur bei den Tem-

[1]) G. C. Simpson, Phil. Mag. (6) **4**, p. 554, 1902

peraturversuchen wurde diese durch einen Wismutdrahtbügel aus Draht von 0,3 mm Querschnitt und 10 cm Länge ersetzt.

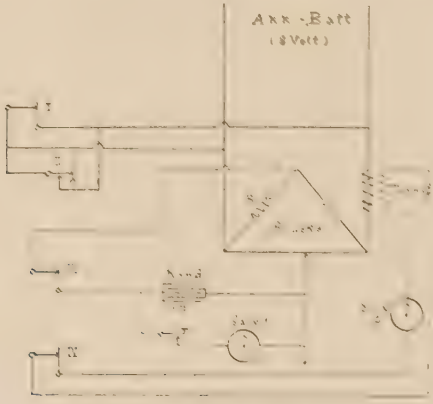
Das untersuchte Wismut war bisher bei allen Arbeiten als gepreßter Draht verwandt worden, der, Lenards selbstgefertigte Drähte ausgenommen, von Hartmann und Braun bezogen war. Es war deshalb geboten, Wismutdraht auf andere Weise als durch Pressen herzustellen und zu untersuchen. Schnorr von Carolsfeld[1]) brachte nun Wismut in drahtähnliche Form, indem er das Metall in einem Glasrohre schmolz und beides, Glas und Metall, zusammen zu dünnen Fäden auszog. Die so gefertigten Wismutdrähte zeigten, nach Wolffs Methode untersucht, die Widerstandsdifferenz gegenüber Wechsel- bez. Gleichstrom bedeutend stärker als die gepreßten. Das magnetische Feld beeinflußte die Erscheinung bei verschiedenen Proben in verschiedener Weise, bei einem der Schnorr v. Carolsfeldschen Drähte wie bei einer Hartmann und Braunschen Spirale, bei einem anderen Exemplar aber so, daß mit zunehmender Feldstärke der Widerstand für Wechselstrom sich verringerte, ein Minimum erreichte und dann erst anstieg. Verunreinigungen waren von geringem Einfluß auf die Erscheinung, obgleich sie den Temperaturkoeffizientem des Widerstandes wesentlich änderten. Selbst eine Legierung von 5 Teilen Wismut und 3 Teilen Antimon zeigte die Eigentümlichkeit des Wismuts, wenn auch in geringerem Maße als das reine Metall. An Drähten aus Antimon fanden sich die Ergebnisse der früheren Untersuchungen bestätigt.

Den Wechselstrom-Gleichstromeffekt am Wismut außerhalb des Magnetfeldes im einzelnen zu verfolgen, war, da dieser Effekt sehr klein ist, Simpson nicht gelungen. Wollte man über diesen Punkt Genaueres erfahren, so mußte man eine weit empfindlichere Anordnung verwenden, als es die Simpsonsche war. Pallme-König[2]) stellte nun eine Anordnung zusammen, die sehr empfindlich war und vor allem sehr rasch und genau arbeitete, sodaß sich mit ihr der Effekt außerhalb des Magnetfeldes ver-

[1]) Ernst Schnorr v. Carolsfeld, Dissertation, München 1904.

[2]) Paul Pallme-König, Dissertation, Leipzig 1907; Drudes Ann. **25**, p. 921, 1908.

folgen ließ. Er setzte in der Simpsonschen Schaltung an Stelle des rotierenden Momentankontaktes den Helmholtzschen Pendelunterbrecher, welcher, da er auf 10^{-4} Sek. genau arbeitet, es möglich macht, sehr rasch verlaufende Vorgänge zu verfolgen. Der Pendelunterbrecher besteht bekanntlich aus einer Anzahl (hier 4) von Öffnungs- bez. Schließungskontakten, welche durch ein fallendes Pendel nacheinander in Tätigkeit gesetzt werden, und dies in sehr kurzen durch Verschieben der Kontakte gegen-

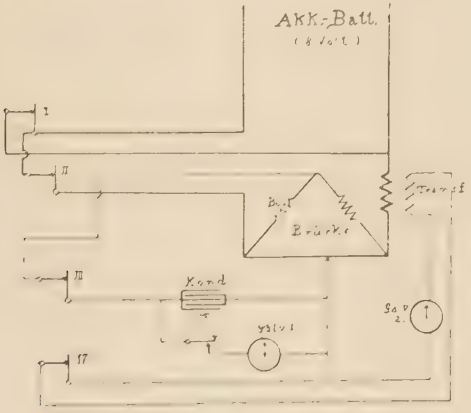


Schaltungsschema 1.

Fig. 1.

einander beliebig wählbaren Zeiträumen. Es muß sich nun der zu beobachtende Vorgang, durch das Pendel ausgelöst, bei jeder Messung in derselben Weise wiederholen: Sein Beginn muß durch einen der Pendelkontakte bestimmt werden. Darum konnte Pallme-König nicht wie Simpson von einer Wechselstrommaschine den Strom entnehmen, sondern er mußte Stromanstieg bezw. Stromabfall durch einen der Pendelkontakte auslösen. Er untersuchte darum bei nur ansteigendem oder nur abfallendem Strome. Da nun zur Beobachtung der Spannungsverhältnisse im Nullinstrumentzweig der Brücke nur äußerst kurze Zeiten zur Verfügung standen, konnte nicht ein Galvanometer direkt eingeschaltet werden. Dies hätte wegen seiner

durch die Selbstinduktion bedingten Trägheit keinen Ausschlag gegeben. Es wurde darum ein Kondensator zur Messung der Spannung verwendet und dessen Ladung nachträglich ballistisch mit dem Galvanometer gemessen. Der Stromanstieg oder -abfall wurde mit einem Transformator verfolgt, in dessen sekundärer Spule ein Galvanometer lag. Es ergaben sich demnach die beiden Schaltungsschemata 1 und 2, von denen 1 für Messungen bei Stromanstieg, 2 für Messungen bei Stromabfall Verwendung fand.



Schaltungsschema 2.

Fig. 2.

In der durch Schema 1 vor Augen geführten Anordnung öffnet zunächst Kontakt I den Kurzschluß der Akkumulatorenbatterie und läßt dadurch den Strom in die Brücke treten. Dann schaltet III den Kondensator ab und IV löst zu gleicher Zeit das Galvanometer 2 vom Transformator. Schließlich stellt II den Kurzschluß der Akkumulatorenbatterie wieder her.

Bei der Schaltung für die Versuche mit Stromabfall läßt Kontakt I bei seiner Öffnung den Strom in die Brücke eintreten, II unterbricht ihn und dann öffnen III und IV wie bei der anderen Anordnung gleichzeitig den Kondensator- bez. Galvanometerkreis.

Pallme-König untersuchte nun eine Hartmann- und Braunsche Wismutspirale von ungefähr 25 Ohm Widerstand. Der Gang der Versuche war der folgende: Die Brücke wurde abgeglichen, sodaß für Gleichstrom im Kondensatorkreis keine Spannung vorhanden war. Dann wurden durch das Pendel die Kontakte I bis IV entsprechend ihrer jeweiligen Einstellung nacheinander ausgelöst. Dadurch wurde bewirkt, daß an einer bestimmten Stelle des Stromanstiegs bez. -abfalles die Spannung im Kondensatorkreis gemessen wurde. Diese gab die Widerstandsänderung an. Wie weit der Stromanstieg oder -abfall vorgeschritten war, zeigte das Galvanometer im sekundären Transformatorkreis.

Das Ergebnis von Pallme-Königs Beobachtungen ist: Außerhalb des Feldes zeigt der Meßkondensator eine Ladung, welche bei Stromanstieg einer Verkleinerung, bei Stromabfall einer Vergrößerung des Wismutwiderstandes entsprechen würde. Im starken magnetischen Felde ist der Effekt von entgegengesetztem Vorzeichen und ungleich größer. (Der letztere Effekt ist allerdings nur für Stromanstieg bestimmt.)

Sehen wir zunächst von dem Effekt im Magnetfelde ab, so können wir es nach Pallme-Königs Versuchen als erwiesen ansehen, daß (außerhalb des Feldes) Wismutdraht bei Stromanstieg Energie aufnimmt, diese aber beim Stromabfall wieder von sich gibt. Wie aber diese Energieaufspeicherung vor sich geht, darüber lassen die angeführten Versuche keinen Schluß zu. Es stellt sich also für weitere Untersuchungen die Aufgabe, den in Rede stehenden Wismuteffekt noch genauer im einzelnen zu verfolgen, vorerst einmal den Effekt außerhalb des Feldes, und erst, wenn über diesen etwas Klarheit gewonnen war, zu den verwickelteren Erscheinungen im Magnetfelde überzugehen.

Als Aufgabe ist der vorliegenden Arbeit darum gestellt worden, Bedingungen aufzusuchen, von welchen der in Rede stehende Effekt außerhalb des Feldes abhängt, und zu prüfen, welche Gesetze er befolgt.

II. Allgemeines über die Versuchsanordnung und die verwandten Apparate.

Es empfiehlt sich, um später, bei Beschreibung der Versuche, den Zusammenhang nicht zerreißen zu müssen, einige allgemeine Bemerkungen über die Versuchsanordnungen vorauszuschicken.

Da alle Versuche mit sehr rasch sich ändernden Strömen vorgenommen wurden, so war bei allen Schaltungen besonders auf Vermeidung von gegenseitiger Induktion der Leitungen zu achten. Weiterhin mußte auf peinlichste Isolation der Anordnung gesehen werden, da die gemessenen Ströme bez. Elektrizitätsmengen sehr klein waren. Es gelangten darum als Isolationsmittel nur Paraffin und Hartgummi, ausnahmsweise nur trockenes Glas zur Verwendung. In den Sommermonaten gewährten auch die genannten Stoffe keine dauernde Isolation, da infolge des hohen Feuchtigkeitsgehaltes der Luft sich im kühlen Zimmer alles mit einer leitenden Wasserhaut überzog; die Versuche konnten erst nach jedesmaligem sorgfältigen Trocknen der ganzen Anordnung mittelst eines heißen Luftstromes ausgeführt werden.

Da die Institutsleitung nur technisch isoliert ist, dienten als Stromquelle auf Paraffin gesetzte mittelgroße Akkumulatoren, deren Spannung sich als vollständig genügend konstant erwies. Zu Meßinstrumenten wurden verwandt Normalglimmerkondensatoren (Nr. 61212 und Nr. 77168) von Siemens und Halske, die so eingerichtet waren, daß durch Stöpselung von ihnen 0,1 bis 1,0 Mikrofarad benutzt werden konnten. Sie waren gut isoliert, sodaß nach 5 Minuten noch keine Verminderung der Ladung nachzuweisen war. Die Spannungen bez. Elektrizitätsmengen in den Kondensatoren wurden mit einem Deprez-d'Arsonval-Galvanometer (Nr. 79595) von Siemens und Halske ballistisch gemessen, wobei die Ausschläge mit Spiegel und Skala verfolgt wurden. (Die Empfindlichkeit bei 182 cm Skalenabstand war für konstanten Strom $47{,}10^{-10}$ Amp. auf 1 Millimeter Ausschlag). Elektrizitätsmengen und Galvanometer-

ausschläge waren einander fast streng proportional, wie die nachfolgende Tabelle 1 zeigt, in welcher die Ausschläge bei verschiedenen Spannungen und verschiedenen Kapazitäten des Kondensators eingetragen sind.

Tabelle 1.

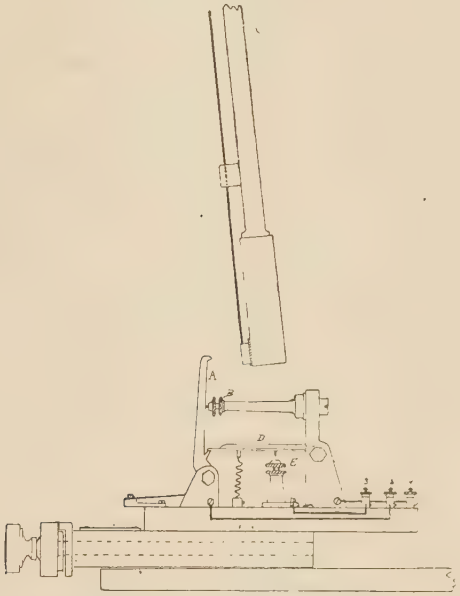
Volt	0,1 MF. mm	0,2 MF. mm	0,3 MF. mm	0,4 MF. mm	0,5 MF. mm	0,6 MF. mm	0,7 MF. mm	0,8 MF. mm	0,9 MF. mm	1,0 MF. mm
0,02	1,5	3,3	4,5	6,2	8,1	10,0	11,6	13,1	14,7	16,4
0,04	3,4	6,4	10,0	13,2	16,3	19,7	23,0	26,2	29,4	37,6
0,06	4,8	10,0	14,6	19,5	24,4	29,5	34,5	39,4	44,5	49,3
0,08	6,5	13,2	19,8	26,2	33,0	39,5	46,0	52,6	59,0	65,2
0,10	8,3	16,9	24,5	32,6	41,4	49,6	57,6	65,8	73,9	82,0

Um die sehr rasch verlaufenden Vorgänge im Wismutdraht verfolgen zu können, wurde wie bei den Pallme-Königschen Versuchen auch in der vorliegenden Arbeit der Helmholtzsche Pendelunterbrecher[1]) benutzt. Der verwendete Apparat stammte aus der Fabrik von Prof. Edelmann-München. Er besaß 4 Kontakte von der Form, wie sie die Abbildung zeigt. Jeder von ihnen konnte als Öffnungs- oder als Schließungskontakt geschaltet werden, je nachdem man die Klemmen 1 und 2 oder 1 und 3 wählte. Da die Fallknagge D, nachdem der Hebel A durch den Pendelkörper umgeschlagen worden ist, nur mit sehr geringer Geschwindigkeit auf den Stempel E aufschlägt, so erfolgt der dadurch bewirkte Stromschluß verhältnismäßig langsam, sodaß den Schließungskontakten nur Funktionen zuerteilt werden konnten, welche für die Messung selbst belanglos waren. (Vergl. U. Seiler, Martin Gildenmeister, Paul Pallme-König).[2])

[1]) M. Th. Edelmann, Drudes Ann. **3**, p. 274, 1900; Martin Gildenmeister und Otto Weiß, Drudes Ann. **17**, p. 174,; Zeitschrift für Instrumentenkunde **25**, p. 175, 1905.

[2]) U. Seiler, Wied. Ann. **61**, 1897; l. c.

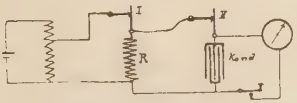
Die Kontakte waren gegeneinander bis zur Entfernung von 4 cm verstellbar mittelst Mikrometerschrauben, an deren



Pendelkontakt.

Fig. 3.

Trommel $^1/_{200}$ mm Verschiebung abgelesen werden konnte. Die Einstellung zweier Kontakte, sodaß sie vom Pendel zu gleicher Zeit in Tätigkeit gesetzt wurden, erfolgte mittelst der Methode, welche durch das Schaltungsschema (3) erläutert ist: Wird Kontakt I eher ausgelöst als Kontakt II, so hat der Kondensator bereits einen Teil der Ladung verloren, ehe II die Entladung unterbricht. Wählt man nun den Widerstand R klein genug, so erhält man einen sehr plötzlichen Abfall der Kondensatorspannung. Durch Verschieben eines der beiden Kontakte kann man es erreichen, daß gerade noch keine Ent-



Schaltungsschema 3.

Fig. 4.

ladung des Kondensators zu beobachten ist. Bei einer solchen Einstellung werden beide Kontakte gleichzeitig getroffen.

Die Bestimmung der Pendelzeitkonstanten, d. h. der Zeit, welche zwischen der Auslösung zweier Kontakte vergeht, die $^1/_{200}$ mm gegeneinander verstellt sind, geschah auf die gleiche Weise, wie sie Radakovic[1]), Edelmann[2]) und auch Pallme-König[3]) angeben: Die Entladung des Kondensators in der durch Schema (3) gegebenen Schaltung, diesmal aber durch einen hohen Widerstand R, beginnt beim Aufschlagen des Kontaktes I und wird bei der Auslösung des Kontaktes II unterbrochen. Aus der Differenz der Anfangsladung und der Restladung findet man die Zeit, welche zwischen der Auslösung der beiden Kontakte verstrichen ist. Da der Widerstand im Kondensatorkreis groß und die Selbstinduktion verschwindend klein ist, findet die Kondensatorentladung aperiodisch statt. Darum gilt die Gleichung

$$q = q_0 \, e^{-\frac{t}{RC}},$$

wobei bedeuten:

q_0 Anfangsladung des Kondensators,
q Restladung des Kondensators,
R selbstinduktionsloser Widerstand i. K.-Kreis,
C Kapazität des Kondensators,
t Entladezeit.

Aus obiger Gleichung folgt

$$t = R \cdot C \, (\log q_0 - \log q) : \log e.$$

oder wegen der Proportionalität der Kondensatorladungen q mit den Galvanometerausschlägen a:

$$t = R \cdot C \, (\log a_0 - \log a) : \log e.$$

t dividiert durch den Abstand der Kontakte I und II voneinander, wobei $^1/_{200}$ mm Längeneinheit ist, liefert die Zeitkonstante T.

---

[1]) Radaković, Sitzungsberichte der Akademie zu Wien, **109**, Abt. IIa, 1900.

[2]) Edelmann, loc. cit., p. 278.

[3]) Pallme-König, loc. cit., p. 5 (Dissertation); p. 921 (Drudes Ann.)

Die Beobachtung ergab

$$\frac{a_0}{a} = \frac{1436}{273},$$

wobei

$$R = 3000\ \Omega,$$

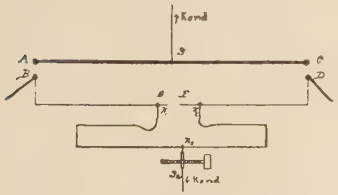
$$C = 0{,}501\ \text{MF},$$

$$\text{Kontaktentfernung} = 1294\ {}^{1}/_{200}\ \text{mm}.$$

Es folgt hieraus:

$$T = 19 \cdot 10^{-7}\ \text{Sek}.$$

Um Störungen durch Selbstinduktion innerhalb der Brücke zu vermeiden, wurde eine für die nachfolgenden Untersuchungen geeignete symmetrische Anordnung konstruiert; ihr Schema ist in Schaltungsschema 4 gegeben. Die zu vergleichenden Widerstände wurden bei AB und CD eingefügt. Der Meßdraht $BEFD$ von hohem Widerstand war zwischen E und F unterbrochen, und mittelst der beiden verstellbaren Quecksilberkontakte K_1 und K_2 war ein Drahtstück von geringem Widerstand eingeschaltet, auf welchem der Schleifkontakt K_3 hin und her bewegt werden konnte. Das Nullinstrument (hier der Kondensator) wurde zwischen G_1 und G_2 eingeschaltet, der Meßstrom bei B und D zugeführt. Die grobe Einstellung erfolgte mittelst K_1 und K_2, die Feinstellung mit K_3. Da die Brücke nicht zum Messen, sondern nur zum genauen Abgleichen der Widerstände zu dienen hatte, erwies sie sich als zweckmäßig, denn sie vermied die nie ganz selbstinduktionsfreien Zusatzwiderstände und Kapazität liefernden massiven Metallteile der Walzenbrücken und gestattete eine ebenso feine Einstellung wie diese.



Schaltungsschema 4.

Fig. 5.

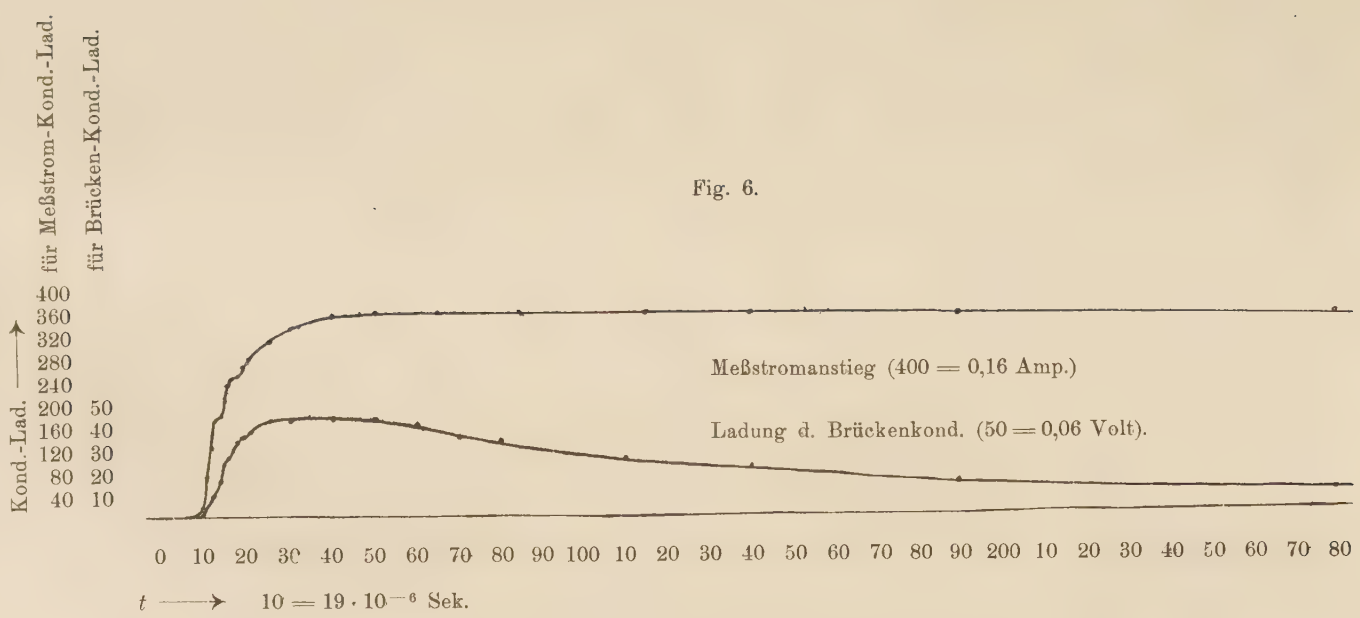
III. Wiederholung der Pallme-Königschen Versuche.

Bei der Wiederholung der Pallme-Königschen Versuche wurde für die Beobachtungen bei Stromanstieg im wesentlichen Schaltungsschema 1 beibehalten. Nur wurde, um die Störungen durch Selbstinduktion möglichst zu vermeiden, an Stelle der Kohlrausch'schen Walzenbrücke (in der üblichen Ausführung), welche Pallme-König verwandt hatte, die auf Seite 19 beschriebene Anordnung benutzt. Außerdem war zur Messung des Stromanstieges an Stelle des Transformators ein Kondensator im Nebenschluß eingefügt, was bereits Pallme-König in seiner Arbeit empfiehlt. Das Ergebnis der Versuche an einer Hartmann- und Braunschen Spirale (Nr. 499, 25 Ohm) war im großen und ganzen dasselbe wie bei Pallme-König, nur traten die dort über den Stromanstieg gelagerten Schwingungen hier weniger stark auf. Es sei ein Kurvenpaar angegeben:

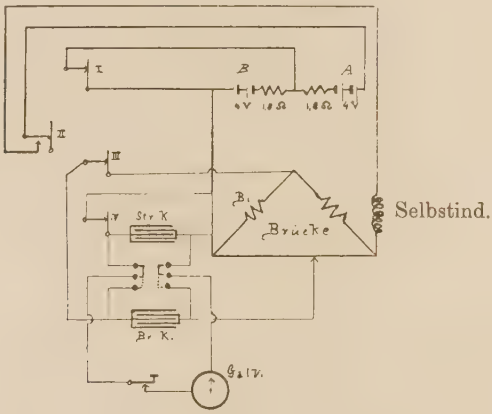
Tabelle 2.

Verschiebung d. Kontaktes I in $^1/_{200}$ mm	Galvanom.-Ausschl. in $^1/_{10}$ mm für den Strommeß-kondensator	Galvanom.-Ausschl. in $^1/_{10}$ mm für den Brücken-kondensator	Verschiebung d. Kontaktes I in $^1/_{200}$ mm	Galvanom.-Ausschl. in $^1/_{10}$ mm für den Strommeß-kondensator	Galvanom.-Ausschl. in $^1/_{10}$ mm für den Brücken-kondensator
5	0	0	20	309	40
7	10	0	25	335	47
8	10	0	30	356	47
9	25	2	40	380	47
10	88	6	50	380	47
11	125	6	60	380	42
12	185	10	70	380	38
13	190	18	80	380	35
14	230	26	110	380	27
15	247	28	140	380	23
16	265	32	190	380	17
17	270	37	240	380	—
18	286	39	290	380	12
19	299	39			

Fig. 6.


Kond.-Lad. ⟶
für Meßstrom-Kond.-Lad.
für Brücken-Kond.-Lad.
400
360
320
280
240
200 50
160 40
120 30
80 20
40 10
Meßstromanstieg (400 = 0,16 Amp.)
Ladung d. Brückenkond. (50 = 0,06 Volt).
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 10 20 30 40 50 60 70 80 90 200 10 20 30 40 50 60 70 80
t ⟶ 10 = 19 · 10⁻⁶ Sek.

Die in obiger Tabelle aufgeführten Beobachtungsergebnisse sind in Fig. 6 dargestellt. Sie zeigen, daß bei Stromanstieg der Kondensator eine Ladung erhält, welche einer Widerstandsverminderung im Wismutdraht entsprechen würde. Diese Ladung steigt rasch, in $4 \cdot 19 \cdot 10^{-6}$ Sek., auf ein Maximum und fällt dann langsam ab; nach $29 \cdot 19 \cdot 10^{-6}$ Sek. ist noch ein Viertel der Maximalladung nachweisbar.



Schaltungsschema 5.

Fig. 7.

Bei den Versuchen mit abfallendem Strome wurde eine größere Änderung in der Schaltung vorgenommen. Hier wurde der Strom nicht, wie bei Pallme-König, durch Unterbrechen der Leitung zum Verschwinden gebracht, sondern durch Entgegenschalten einer elektromotorischen Kraft, welche die den Strom erregende elektromotorische Kraft aufhob. Diese Schaltung ermöglichte es, durch Einfügen größerer oder kleinerer Selbstinduktion den Strom beliebig langsam verschwinden zu lassen, was bei Pallme-König nur sehr begrenzt (durch die Länge des Unterbrechungsfunkens gegeben) der Fall war. Schaltungsschema 5 (Fig. 7) zeigt die Versuchsanordnung:

Kontakt II läßt den Strom der Batterie *A* in die abgeglichene Brücke eintreten. Dann öffnet I den Kurzschluß der Batterie *B*; ihre elektromotorische Kraft vernichtet die von *A*, und der Strom sinkt. Nun schalten IV und III gleichzeitig den Strommeßkondensator und den Widerstandsmeßkondensator ab. Durch Verändern der Selbstinduktion (ein Variometer nach M. Wien) konnte man die Geschwindigkeit des Stromabfalls in gut beobachtbare Größenordnung bringen. Die Brücke ist hier nur schematisch gezeichnet, in Wirklichkeit war es die auf S. 19 beschriebene.

Ein für die Widerstandsänderung der H. und Br.schen Spirale Nr. 499 gefundenes Kurvenpaar sei angegeben: es zeigt, daß der Kondensator eine Ladung erhält, welche einer Widerstandserhöhung im Wismutdraht entsprechen würde.

Tabelle 3.

Verschiebung d. Kontaktes I in $^1/_{200}$ mm	Galvanom.-Ausschl. in $^1/_{10}$ mm für den Strommeßkondensator	Galvanom.-Ausschl. für den Brückenkondensator in $^1/_{10}$ mm	Verschiebung d. Kontaktes I in $^1/_{200}$ mm	Galvanom.-Ausschl. in $^1/_{10}$ mm für den Strommeßkondensator	Galvanom.-Ausschl. für den Brückenkondensator in $^1/_{10}$ mm
0	178	0	16	50	—14
1	149	—3	18	40	—14
2	178	—4	20	34	—14
3	174	—7	25	34	—14
4	168	—9	30	26	—16
5	160	—9	40	14	—14
6	130	—11	70	6	—10
7	108	—11	90	6	—10
8	100	—11	110	6	—9
9	83	—12	130	6	—7
10	74	—13	180	6	—3
12	70	—13	230	6	—3
14	68	—13			

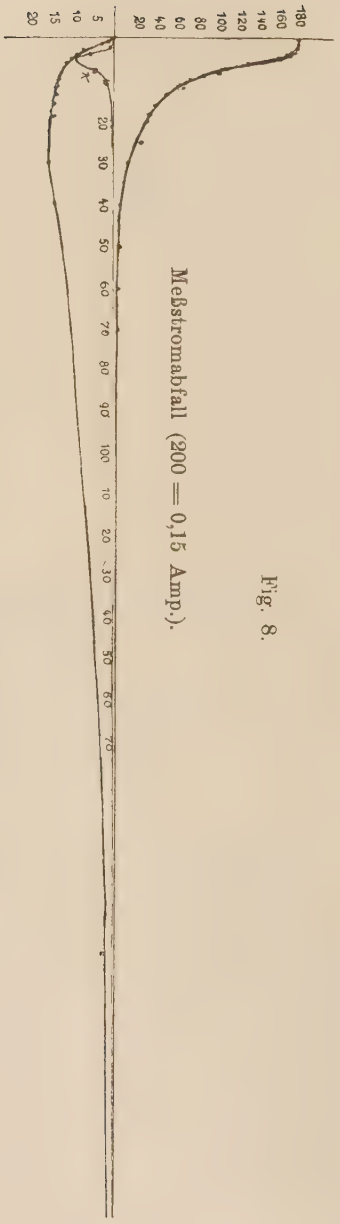


Fig. 8.

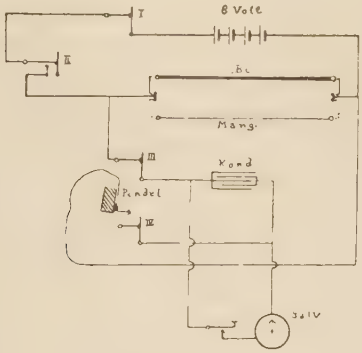
Von besonderem Interesse ist der Umstand, daß die Kurve für die Ladung des Brückenkondensators noch nicht zu Null abgeklungen ist, während der in die Brücke geschickte Strom schon längst keine meßbaren Werte mehr hat. Daß die Trägheit des Kondensators nicht die Ursache ist, zeigt die kleine Kurve K (in Fig. 8), welche gewonnen wurde, indem man den Stromabfall vor sich gehen ließ, während an Stelle der Wismutspirale ein selbstinduktionsloser gleichwertiger Manganinwiderstand eingeschaltet und zum Vergleichswiderstand eine kleine Selbstinduktion hinzugefügt war.

Es ist demnach in der Brücke eine elektromotorische Kraft vorhanden, welche den Kondensator aufgeladen erhält. Sofort stellt sich nun die Aufgabe, zu untersuchen, ob die Wismutspirale Sitz dieser elektromotorischen Kraft ist, d. h., ob nach dem Stromausschalten noch eine kurze Zeit lang an den Enden der Spirale eine Spannung verbleibt.

IV. Untersuchung des Wismuts auf eine elektrische Nachwirkung.

1. Die Beobachtungsmethode.

Verschiedene Gründe empfahlen es, bei den folgenden Versuchen von der Brückenanordnung abzusehen. Zunächst mußte die Anordnung so gestaltet sein, daß man alle in ihr sich abspielenden Vorgänge leicht verfolgen konnte, und dieser Anforderung entspricht doch die Brücke mit der großen Anzahl teils offener teils geschlossener Stromkreise bei rasch sich



Schaltungsschema 6.

Fig. 9.

ändernden Strömen nicht. Weiterhin waren die Angaben des Kondensators beeinflußt von seiner Abklingungsgeschwindigkeit, die je nach den in der Brücke befindlichen Widerständen verschieden war. Schließlich konnte man die Ladungen des Meßkondensators nicht ohne weiteres quantitativ deuten, denn sie waren ganz abhängig von dem durch die Brücke fließenden Strom, der aber bei den Versuchen veränderlich war.

Es wurde nun die Anordnung gewählt, die durch Schema 6 (Fig. 9) wiedergegeben ist. Der Fallkontakt II schließt die Leitung, sodaß der Strom der Akkumulatorenbatterie durch den Wismutdraht fließt. Nachdem der Strom konstant ge-

worden ist, wird der Öffnungskontakt I aufgeschlagen und, da keine wesentliche Selbstinduktion im Kreise vorhanden ist, verschwindet der Strom sehr rasch. Das hierdurch hervorgerufene Abklingen der Spannung an den Enden des Wismutdrahtes wird mit Hilfe des als Spannungsmesser dienenden Kondensators verfolgt. (Ein direkt angeschlossenes Galvanometer konnte wegen seiner Trägheit nicht verwendet werden.) Den Kondensator von Anfang einer jeden Messung mit den Enden des Wismutdrahtes verbunden zu halten und ihn durch das Pendel nur abzuschalten, war unzweckmäßig. Es mußte nämlich verhindert werden, daß er sich erst auf die hohe Spannung auflud, welche an den Enden des Wismutdrahtes herrschte, während dieser vom Strom durchflossen war. Die so entstehende starke Kondensatorladung hätte sich erst nach und nach durch den Wismutdraht ausgeglichen und ihre Reste würden eindeutige Ergebnisse unmöglich gemacht haben. Es durfte also der Kondensator erst nach Beendigung des Stromabfalles angelegt werden. Dazu brauchte man einen rasch und gleichmäßig arbeitenden Schließungskontakt. Dieser wurde dadurch hergestellt, daß einer der mit Glimmer isolierten Stahlbolzen am fallenden Pendel, welcher beim Aufschlagen des zugehörigen Kontaktes an des letzteren Fallhebel anschlägt, mit dem Wismutdraht durch eine gut von der Umgebung isolierte Litze verbunden wurde. Es war dann im Moment des Aufschlagens Leitung hergestellt von dem einen Ende des Wismutdrahtes über den Stahlbolzen und den Fallhebel zu dem Kondensator (s. Abbildung des Pendelkontaktes S. 17). Diese Leitung wurde einen Augenblick nach ihrer Schließung durch einen Kontakt III wieder unterbrochen, sodaß der Kondensator nur ganz kurze Zeit eingeschaltet war, was aber zu seiner Aufladung genügte, sodaß er anzeigen konnte, ob am Wismutdraht noch Spannung vorhanden war oder nicht; die Ladung wurde nachträglich mit dem Galvanometer ballistisch gemessen.

Wenn nun bei der beschriebenen Versuchsanordnung eine Reihe von Versuchen so angestellt wurden, daß diese sich nur

dadurch voneinander unterschieden, daß Kontakt I verschiedene Stellungen einnahm, so stellte man die Spannung am Wismutdraht zu verschiedenen Zeiten nach dem Stromabfall fest. Man konnte also eine Kurve aufnehmen, welche das Abklingen dieser Spannung zeigte. — Es war noch zu bedenken, daß durch die Verstellung des Kontaktes I die Dauer des Stromfließens geändert wurde. Diese erwies sich aber nach Versuchen als belanglos, sofern sie nur größer als $8 \cdot 10^{-5}$ Sek. war.

Bei dem oben beschriebenen Schließungskontakte war infolge des starken Anpralles Abklirren wahrscheinlich und deshalb Unsicherheit der Kondensatoraufladung zu befürchten. Die gute Übereinstimmung der Versuche untereinander zeigt aber, daß sich die geschilderte Anordnung gut verwenden ließ.

2. Diskussion der Meßanordnung.

Wir benutzen zur Messung der an den Enden des Wismutdrahtes vorhandenen Spannungen einen Kondensator, welcher sich, da keine in Betracht kommende Selbstinduktion vorhanden ist, aperiodisch auflädet. Für diesen Vorgang gilt nun die Beziehung

$$q = PC\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right),$$

wenn bedeutet:

q die im Kondensator befindliche Elektrizitätsmenge,
P die zu messende Spannung an den Drahtenden,
C die Kapazität des Kondensators,
R den Widerstand im Kondensatorkreis,
t die zur Aufladung des Kondensators vergönnte Zeit.

Voraussetzung ist hierbei, daß die an den Drahtenden vorhandenen Elektrizitätsmengen so groß sind, daß P durch das Ausschalten des Kondensators praktisch sich nicht ändert. Wir wollen diese Forderung bei unseren Versuchen als erfüllt annehmen. Spätere Untersuchungen (vergl. S. 37) werden zeigen, daß wir zu dieser Annahme berechtigt sind.

Aus obiger Gleichung folgt nun, daß bei konstant gehaltenen C, R und t die Ladungen q des Kondensators proportional der zu messenden Spannung P sind, auch wenn der

Kondensator nicht ganz aufgeladen ist. Es empfiehlt sich aber, die Versuchsbedingungen so zu wählen, daß vor dem Abschalten des Kondensators seine Aufladung praktisch schon vollendet ist. Es machen sich sonst die an sich geringen Unsicherheiten der Pendelkontakte wegen der Steilheit des Kondensatoranstieges geltend. Nur ausnahmsweise wurde deshalb bei den später zu beschreibenden Versuchen mit nicht aufgeladenem Kondensator gearbeitet.

Die Aufladungsgeschwindigkeit des Meßkondensators ist für unsere Untersuchungen sehr wichtig. War sie nämlich zu gering, so folgten die Spannungsänderungen im Kondensator denen am Wismutdraht nur unvollkommen. Es war zu fordern, daß der Kondensator seine Ladung rascher variieren konnte, als die elektromotorischen Kräfte am Wismutdraht sich änderten. Nur dann gab der Kondensator die richtigen Spannungswerte an. Das Produkt $R \cdot C$, dem ja die Aufladungsgeschwindigkeit proportional ist, war also möglichst klein zu wählen.

Auch die zur Aufladung gewährte Zeit t spielt eine beachtenswerte Rolle in der Anwendung unserer Meßmethode. Fiel nämlich der Anfangspunkt der Kondensatoraufladung in die Zeit, während welcher am Draht noch hohe Spannung, vom Stromdurchgang herrührend, herrschte, so lud sich der Kondensator auf diese hohe Spannung auf, und die nach dem Stromabfall im Kondensator verbleibenden Reste dieser starken Ladung machten eindeutige Messungsergebnisse unmöglich. Da also gute Resultate nur zu erhalten waren, wenn der Kondensator erst nach dem Verschwinden der hohen Spannungen angelegt wurde, so entzogen sich die Vorgänge der Beobachtung, welche sich in dem Zeitraume abspielten, den man erhielt, wenn man zu der durch den Stromabfall erfüllten Zeit noch die zur Aufladung des Kondensators vergönnte Zeit addierte. Diese letztere mußte also möglichst kurz gewählt werden.

Sowohl $R \cdot C$ auch als t müssen nach unseren Erwägungen recht klein genommen werden. Für die Wahl von C war die Deutlichkeit der Galvanometerausschläge maßgebend; sie erwiesen sich noch gut verfolgbar bei 0,3 Mikrofarad.

Als Abstand der den Kondensator bedienenden Kontakte wurden 10 Trommelteile = 0,05 mm gewählt. Da am Schließungskontakt IV Abklirren wahrscheinlich war, mußte experimentell bestimmt werden, welcher Zeitwert t diesem Abstand entsprach. Es wurde dies dadurch ermittelt, daß man den Kondensator mit Hilfe einer bekannten konstanten Spannung durch einen bekannten selbstinduktionslosen Widerstand auflud, aber dabei den Widerstand so groß wählte, daß die Ladung des Kondensators beim Abschalten noch nicht vollendet sein konnte; die Spannung wurde hierbei geliefert durch einen andauernd vom Strom durchflossenen Manganindraht, welcher an Stelle des Wismutdrahtes in die Anordnung eingefügt wurde. Aus dem Verhältnis der in der zur Aufladung gewährten Zeit t erreichten Ladung zur vollständigen Ladung ergab sich die Zeit selbst aus der Gleichung:

$$q = q_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right).$$

Es wurden gewählt:

$$R = 37{,}4 \text{ Ohm},$$
$$C = 0{,}30 \text{ MF}.$$

und gefunden

$$\frac{q}{q_0} = \frac{15{,}0}{20{,}3},$$

woraus folgt für die zur Aufladung vergönnten Zeit

$$t = 15{,}0 \cdot 10^{-6} \text{ Sek}.$$

Es ist nun noch die Größe von R zu bedenken. Wie die Kondensatorladungen von den Werten für R beeinflußt werden, zeigt die Kurve

$$\frac{q_0 - q}{q_0} = e^{-\frac{t}{RC}},$$

wobei für

$$t = 15{,}0 \cdot 10^{-6} \text{ Sek}.$$
$$C = 0{,}30 \text{ MF}.$$

einzusetzen sind. Zunächst ergibt sich, daß für Werte von R, die kleiner sind als

10,65 Ohm,

der Fehlbetrag der Kondensatorladung kleiner als $1\,^0/_0$ ist. Im übrigen hängt er folgendermaßen von R ab:

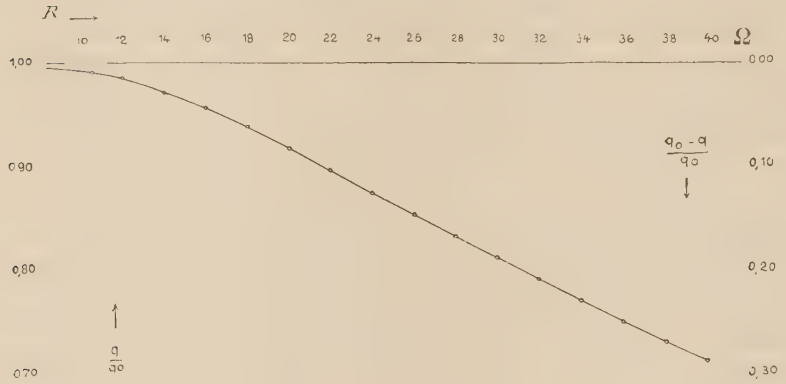


Fig. 10.

Tabelle 4.

R	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	Ohm
$\frac{q_0 - q}{q_0}$	1,5	2,8	4,3	6,1	8,1	10,2	12,3	14,5	16,6	18,7	20,8	22,8	21,8	26,7	28,5	$\cdot 10^{-2}$

Die Kurve in Fig. 10 zeigt die Beziehung zwischen den Kondensatorladungen und R. Die bei verschiedenem Widerstand im Kondensatorkreis gewonnenen Beobachtungsergebnisse hat man, um sie mit einander vergleichen zu können, nach dem aus der Kurve zu entnehmenden Maßstab zu vergrößern.

Es blieb nun übrig, die Meßmethode in Volt zu eichen, d. h. zu bestimmen, welche Spannung am Versuchsdraht die die Kondensatorladung messenden Galvanometerausschläge bedeuteten. Zu diesem Zwecke wurde an Stelle des Wismutdrahtes in die Anordnung ein gerade ausgespannter Manganindraht von bekanntem Widerstand R eingefügt. An seinen Enden herrschte eine konstante Spannung, welche dadurch hervorgerufen wurde, daß er mit einem Akkumulator a und einem Widerstand W in Serie geschaltet war. Natürlich wurde der Strom der 8 Volt-Akkumulatorenbatterie bei diesen Ver-

suchen abgeschaltet. Es blieb sonst aber die ganze Anordnung absichtlich unverändert, um die Verhältnisse denen bei der Beobachtung des Wismutdrahtes möglichst gleich zu gestalten. Insbesondere wurden die Kontakte I und II stets mit durch das Pendel ausgelöst, damit die gleiche Pendelgeschwindigkeit wie bei den Versuchen herrschte.

Die Spannung des Akkumulators a betrug 2,00 Volt. Demnach herrschte an den Enden des Manganindrahtes eine Spannungsdifferenz von

$$P = 2{,}00 \ \frac{R}{W+R} \text{ Volt.}$$

Es wurden nun folgende Beobachtungsergebnisse gewonnen:

Tabelle 5.
$R = 37{,}4$ Ohm.

W Ohm	P Volt	Galv.-Ausschl. mm
$20 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-1}$
10	7	14
8	9	18
6	12	23
4	19	37
2	37	68
1	72	131

Tabelle 6.
$R = 19{,}1$ Ohm.

W Ohm	P Volt	Galv.-Ausschl mm
$60 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$16 \cdot 10^{-1}$
40	10	23
20	19	46
10	38	88
8	47	107
6	62	138
5	74	170

Tabelle 7.
$R = 11{,}7$ Ohm.

W Ohm	P Volt	Galv.-Ausschl. mm
$80 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-1}$
40	5	16
20	11	30
10	23	58
8	29	71
6	38	96
4	55	138
2	110	268

Tabelle 8.
$R = 5{,}04$ Ohm.

W Ohm	P Volt	Galv.-Ausschl. mm
$40 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-1}$
20	5	14
10	10	26
8	13	35
6	17	45
4	25	65
2	48	123
1	96	239

Tabelle 9.

$R = 0{,}715$ Ohm.

W Ohm	P Volt	Galv.-Ausschl. mm
$40 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-1}$
20	7	19
10	14	38
8	18	48
6	23	60
4	35	85
2	67	168

Die hier angeführten Beobachtungsergebnisse sind durch die Kurven in Fig. 11 dargestellt. Man sieht, daß die Spannungen sehr annähernd proportional den Galvanometerausschlägen sind und daß, wenn R kleiner als 12 Ohm ist, man mit praktisch ganz aufgeladenem Kondensator arbeitet.

Die Versuchsergebnisse stehen in gutem Einklang mit der auf S. 30 durch theoretische Erwägungen für die Kondensatorladungen gewonnene Korrektionstabelle bez.-Kurven, welche nach der Proportionalität von Kondensatorladungen und Galvanometerausschlägen (vergl. Seite 16) auch für die letzteren gelten muß. Es ist demnach die Anwendbarkeit dieser Korrektionskurve sicher gestellt.

3. Feststellung des Bestehens einer elektrischen Nachwirkung am Wismutdraht.

Um feststellen zu können, ob an den Enden des Wismutdrahtes nach dem Stromausschalten noch eine Spannung weiterbesteht, die bei anderen Drähten nicht vorhanden ist, mußte dafür gesorgt werden, daß man, ohne an der Meßanordnung im übrigen etwas zu ändern, den Wismutdraht durch einen beliebigen anderen Draht ersetzen konnte. Mit Hilfe von Quecksilbernäpfen war es nun leicht möglich, an Stelle des

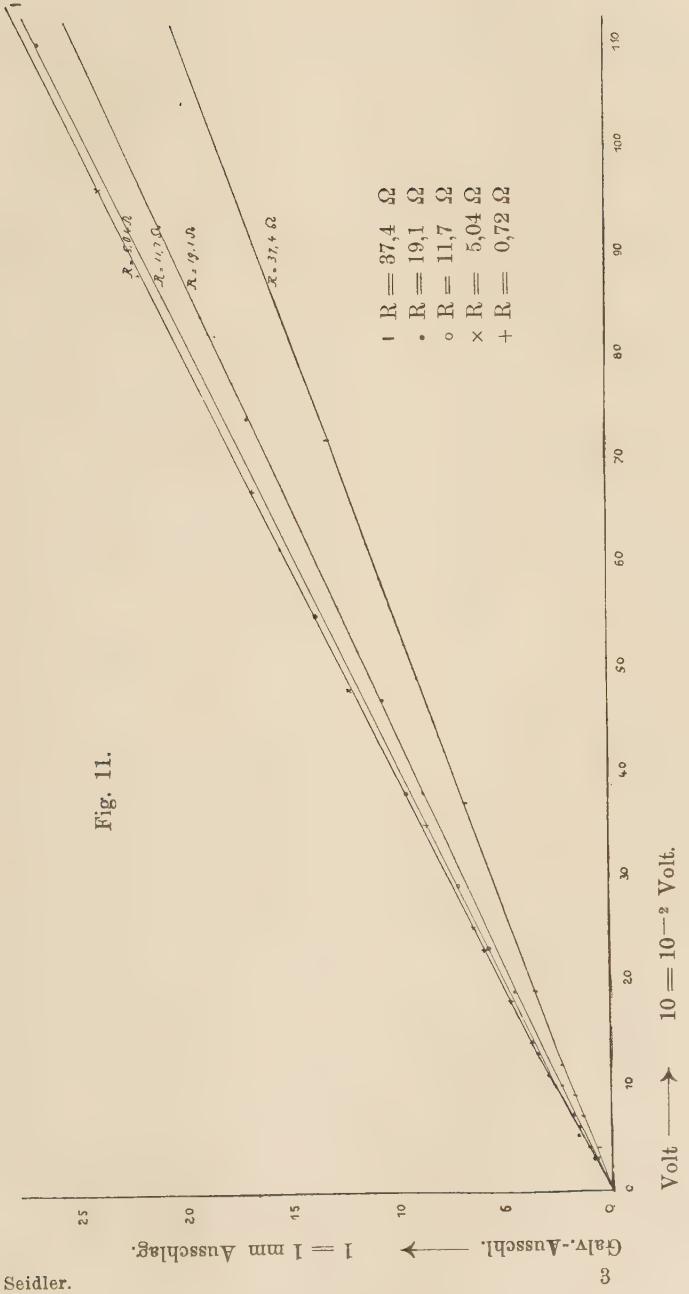
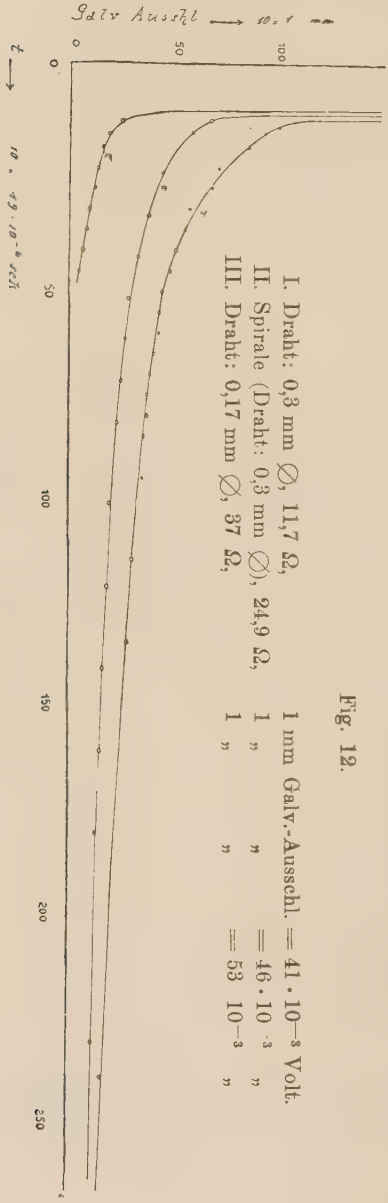

Galv.-Ausschl. ⟶ 1 = 1 mm Ausschlag.
Volt ⟶ 10 = 10⁻² Volt.
! R = 37,4 Ω
• R = 19,1 Ω
○ R = 11,7 Ω
× R = 5,04 Ω
+ R = 0,72 Ω

Fig. 11.

Wismutdrahtes einen Vergleichsdraht einzuschalten. Letzterer wurde meist durch einen Manganindraht von gleichem Widerstand wie der Wismutdraht gebildet.



I. Draht: 0,3 mm ∅, 11,7 Ω, 1 mm Galv.-Ausschl. = $41 \cdot 10^{-3}$ Volt.
II. Spirale (Draht: 0,3 mm ∅), 24,9 Ω, 1 „ „ = $46 \cdot 10^{-3}$ „
III. Draht: 0,17 mm ∅, 37 Ω, 1 „ „ = $53\ 10^{-3}$ „

Fig. 12.

Die zunächst zu beschreibenden Versuche wurden nun folgendermaßen ausgeführt: Die den Kondensatorzweig bedienenden Kontakte III und IV (Schema 6, s. Fig. 9) wurden bei allen Versuchen unverstellt gelassen; ihr gegenseitiger Abstand betrug 10 Trommelteile, was einem Zeitwert von $15 \cdot 10^{-6}$ Sek. entsprach (s. S. 29). Der den eingeprägten Strom schließende Kontakt II, welcher so gestellt war, daß er vom Pendel so zeitig als möglich getroffen wurde, blieb ebenfalls bei allen Versuchen an seinem Ort. Nur Kontakt I wurde nach jedem Beobachtungspaar um eine Anzahl Trommelteile verschoben, sodaß der Kondensator die am Versuchsdraht bestehende Spannungsdifferenz in verschiedenen Zeiten nach dem Stromabschalten messen konnte. Jedes Beobachtungspaar wurde gebildet von einer Beobachtung am Wismutdraht und einer andern, bei welcher an Stelle des Wismutdrahtes ein Manganindraht von gleichem Widerstand eingeschaltet war.

Infolge der Änderung des Abstandes der Kontakte I und II floß der eingeprägte Strom bei den verschiedenen Versuchen verschieden lange Zeit. Beobachtungen bei verschiedenen Einstellungen des Kontaktes II zeigten aber, daß die Dauer des Stromfließens ohne Belang für die Beobachtungsergebnisse war, sobald der Strom nur konstant geworden war.

Es fand sich nun an der Hartmann- und Braunschen Spirale Nr. 499 (25 Ohm) in der Tat nach dem Abschalten des Stromes noch eine Spannungsdifferenz vor, wie sie am Vergleichsdraht nicht zu beobachten war. Sie klang in sehr kurzer Zeit ab, sodaß sie nach $11 \cdot 10^{-5}$ Sek. bereits auf die Hälfte ihres Wertes herabgesunken war.

Es sei die Abklingungskurve wiedergegeben:

Tabelle 10. (Hierzu Fig. 12 Kurve II).

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanom.-Ausschl. für den Wismutdraht	Galvanom.-Ausschl. für den Vergleichsmang.-Draht
0	Ausschalten des eingeprägten Stromes	
7	3300	3600
8	68	0
12	59	0
22	44	0
32	39	0
42	32	0
52	28	0
62	27	0
72	24	0
82	22	0
102	19	0
122	18	0
142	17	0
162	15	0
182	13	0
232	11	0
282	10	0
482	7	0

Zum Vergleich wurden auch andere von Hartmann und Braun bezogene Wismutdrähte auf demselben Wege untersucht. Diese Drähte waren gerade ausgespannt und, um sie vor Zerbrechen zu schützen, in Glasröhren an ihren Enden eingekittet; der Strom wurde durch angelötete Kupferdrähte zugeführt. Es zeigte sich hier derselbe Effekt, wie an der Spirale:

Tabelle 11. (Hierzu Fig. 12).
Wismutdraht: 0,3 mm ∅. 11,7 Ω.

Verstellung des Kontaktes I	Galvanom.-Ausschl. für den Bi-Draht	Galvanom.-Ausschl. für den Vergleichsdraht
0	Stromausschalten	
8	5800	5340
10	100	2
12	93	0
15	84	0
20	70	0
25	68	0
30	57	0
35	55	0
40	50	0
45	49	0
50	43	0
55	42	0
60	42	0
65	40	0
70	39	0
75	37	0
80	38	0
85	35	0
95	35	0
115	30	0
135	28	0

Stärke des eingeprägten Stromes:

$$i = \frac{8{,}0}{11{,}7} = 0{,}66 \text{ Amp.}$$

Tabelle 12. (Hierzu Fig. 12).
Wismutdraht: 0,17 mm ∅. 37,0 Ω.

Verstellung des Kontaktes I	Galvanom.-Ausschl. für den Bi-Draht	Galvanom.-Ausschl. für den Vergleichsdraht
0	Stromausschalten über die Skala	
6		
8	25	2
12	19	0
15	15	0
20	13	0
25	11	0
30	9	0
35	8	0
40	6	0
45	4	0

Stärke des eingeprägten Stromes:

$$i = \frac{0{,}8}{37{,}0} = 0{,}22 \text{ Amp.}$$

Bevor irgendeine quantitative Deutung der Beobachtungsergebnisse vorgenommen wurde, mußte festgestellt werden, ob die am untersuchten Draht bestehende Spannungsdifferenz sich durch das Anlegen des Meßkondensators nicht verringerte. Man konnte dies dadurch prüfen, daß man die Meßkapazität veränderte. Wenn bei vergrößerter Meßkapazität die die Kondensatorladung messenden Galvanometerausschläge nicht proportional mit den Kapazitäten wuchsen, so reichten die vorhandenen Elektrizitätsmengen nicht aus, um den Kondensator auf die vor dem Kondensatoranschließen im Draht vorhandene Spannungsdifferenz aufzuladen.

Vergrößerte man nun aber die Kapazität und ließ den Widerstand des Versuchsdrahtes unverändert, so verringerte man die Aufladegeschwindigkeit des Kondensators, wodurch aber nach dem auf S. 28 Gesagten die Versuchsbedingungen ungünstig wurden. Es mußte, da das Produkt aus Widerstand und Kapazität die Geschwindigkeit der Aufladung bestimmt,

bei vergrößerter Meßkapazität der Widerstand des Versuchsdrahtes klein gewählt werden. Untersucht wurde darum bei den hier als Beispiel aufgeführten Beobachtungen ein Wismutdraht von 0,3 mm ∅ und 7 cm Länge, der einen Widerstand von nur 1,12 Ohm hatte. Bei der Anwendung größerer Meßkapazitäten war es nach dem auf S. 28 Gesagten weiterhin nötig, um vollständige Aufladung zu erhalten, die zu letzterer gewährte Zeit zu vergrößern, was durch Vergrößerung der gegenseitigen Entfernung der Kontakte III und IV geschah. Man fand nun für die am oben beschriebenen Draht bestehenden Spannungsdifferenzen folgende Galvanometerausschläge:

Tabelle 13.

Verschiebung des Kontaktes I	Meßkap.	Galvanometerausschläge bei 0,3 MF	0,6 MF	0,9 MF	1,8 MF
	Abstand der Kontakte III u. IV i. Trommelt.:	10	20	30	40
22		62	123	—	—
32		53	107	180	—
42		50	98	165	—
62		42	82	142	292
82		38	73	121	248
132		31	58	92	187
182		24	50	77	151
232		21	42	65	130
282		18	36	57	112

Die Galvanometerausschläge wachsen den Meßkapazitäten proportional. Demnach können sich die Spannungen am Wismutdraht durch das Anlegen des Kondensators innerhalb der hier in Betracht kommenden Grenzen nicht ändern. Die Galvanometerausschläge zeigen also direkt die Spannungsdifferenzen an den Enden des Wismutdrahtes an.

Um über die Ursachen des Fortbestehens einer Spannungsdifferenz am Wismutdraht nach dem Stromausschalten einige Kenntnis zu erlangen, mußte man die Bedingungen aufsuchen, von denen diese Nachwirkungserscheinung beeinflußt wird. Zu-

nächst war nun festzustellen, wie sie von dem hervorrufenden Strome abhängt.

4. Abhängigkeit der zurückbleibenden Spannungsdifferenz von der Stromstärke.

Die Abhängigkeit der Nachwirkung von der Stärke des eingeprägten Stromes war leicht aufzufinden; man brauchte nur durch Erhöhung der elektromotorischen Kraft (Vergrößerung der Anzahl der Akkumulatoren) die Stromstärke bei sonst gleichen Versuchsbedingungen zu steigern und die Nachwirkung zu beobachten. Es seien einige Abklingungskurven angegeben:

Tabelle 14.

Draht von Hartmann und Braun, ∅ 0,3 mm.
Widerstand 5,63 Ω.

Verschieb. d. Kont. I in Trommelteilen vom Ausschalten ab gerechnet	Galvanometerausschläge bei einer elektromotorischen Kraft des eingeprägten Stromes von		
	4 Volt	8 Volt	16 Volt
20	36	72	144
30	30	60	122
40	25	51	106
50	20	49	96
70	18	38	78
100	13	30	61
150	10	20	42

Tabelle 15.

Draht von Hartmann und Braun, ∅ 0,5 mm.
Widerstand 5,04 Ω.

Verschiebung d. Kont. I vom Ausschalten ab gerechnet	Galvanometerausschläge bei einer elektromotor. Kraft des eingeprägten Stromes von	
	8 Volt	16 Volt
20	32	68
30	28	50
50	19	37
70	16	28
100	11	20
150	6	12

Tabelle 16.

Draht von Hartmann und Braun, ∅ 0,17 mm.

Widerstand 27 Ω.

Verschiebung d. Kont. I vom Ausschalten ab gerechnet	Galvanometerausschläge bei einer elektromotor. Kraft des eingeprägten Stromes von	
	4 Volt	8 Volt
11	20	40
13	18	37
15	17	24
25	10	22
35	9	20
45	7	18

Die Versuche lehren, daß die Änderung der Stromstärke bei ein und demselben Draht nicht die Form, sondern nur den Maßstab der Abklingungskurve beeinflußt, und zwar erscheinen die Ordinaten in demselben Verhältnis vergrößert, in dem der Strom verstärkt worden ist.

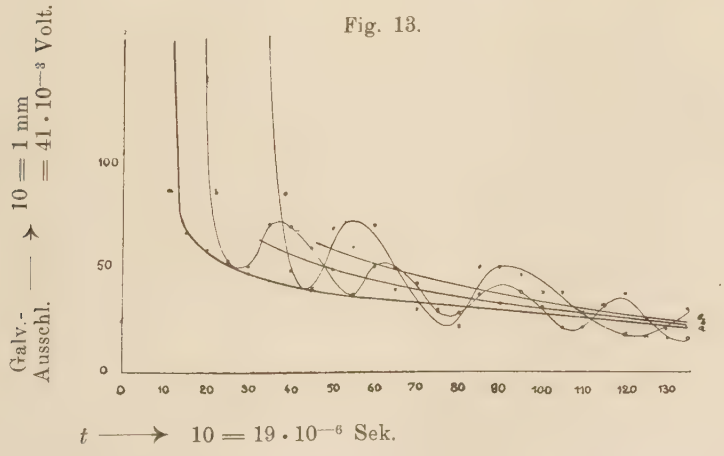
Abhängigkeit der zurückbleibenden Spannungsdifferenz von der Geschwindigkeit des Stromabfalles.

Weniger einfach ließ sich die Abhängigkeit der Nachwirkung von Geschwindigkeit der Stromänderung feststellen. Es konnte die Geschwindigkeit des Stromabfalles nur dadurch geändert werden, daß man eine größere oder kleinere Selbstinduktion (bei den vorliegenden Versuchen gebildet durch das M. Wiensche Variometer) in den Kreis: Akkumulatorenbatterie-Wismutdraht einschaltete. Durch dieselbe wurde beim Stromunterbrechen ein dem ursprünglich fließenden Strome gleichgerichteter Extrastrom erzeugt, der infolge seiner, durch die Größe der eingeschalteten Selbstinduktion gegebenen hohen Spannung einen Öffnungsfunken hervorrief. Dieser lieferte nun dem Strome eine Brücke über die Öffnungsstelle, deren Widerstand rascher oder langsamer, je nach der Größe der eingefügten Selbstinduktion, praktisch unendliche Werte annahm.

Natürlich bietet ein solcher Öffnungsfunken wenig streng bestimmte Verhältnisse. Den Leitungskreis aber geschlossen zu halten und die elektromotorische Kraft des Stromes durch Entgegenschalten einer anderen zu vernichten, wie es z. B. auf S. 22 beschrieben ist, war hier nicht zweckmäßig, weil man eine so genaue Abgleichung der gegeneinanderzuschaltenden elektromotorischen Kräfte, wie sie hier erforderlich gewesen wäre, nicht erreichen kann, ohne die Anordnung so zu komplizieren, daß bei dem raschen Stromabfall in ihr ein förmliches Gewirr von elektrischen Schwingungen hervorgerufen worden wäre.

Schwingungen traten nun allerdings auch bei der verwendeten Schaltung auf, aber infolge der Einfachheit der Anordnung war ihr Verlauf noch übersichtlich, und man konnte die Abklingungskurve als Achse, um welche die Schwingungen erfolgten, graphisch ermitteln. Es seien zunächst die Beobachtungsergebnisse an einem Wismutdraht von Hartmann und Braun vom Querschnitt 0,3 mm und vom Widerstand 11,7 Ohm angegeben. Die Stärke des eingeprägten Stromes betrug bei allen Beobachtungen 0,52 Amp.

Fig. 13.



• Abklingung bei der Selbstinduktion 0 im Kreise.
○ „ „ „ „ $5 \cdot 10^6$ „ „
× „ „ „ „ $10 \cdot 10^6$ „ „

Tabelle 17.

Verschiebung d. Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei einer zugeschalteten Selbstind. von		
	0 CGS	$5 \cdot 10^6$ CGS	$10 \cdot 10^6$ CGS
0	Stromausschalten		
15	66	—	—
20	58	500	—
25	52	52	—
30	47	50	—
35	44	70	200
40	—	68	48
45	39	58	40
50	—	48	68
55	36	37	58
60	—	50	70
65	34	48	40
70	—	43	32
75	—	28	32
80	—	28	23
85	30	37	50
90	—	32	50
95	—	38	47
100	—	31	38
105	—	21	38
110	—	22	28
115	—	31	32
120	—	38	18
125	—	25	18
130	—	16	22
135	22	17	32

Aus dem Kurvenbild ersieht man, daß es den Anschein hat, als ob die graphisch gefundene Abklingungskurve bei langsamerem Stromabfall gegen die bei rascherem Stromabfall nach rechts verschoben sei. Eine solche Verschiebung ließe sich dann erklären, wenn man annähme, daß die Nachwirkung

nicht vom Stromabfall, sondern vom Fließen des Stromes hervorgerufen würde, denn dann wirkt bei langsamem Abfall die hervorrufende Ursache länger auf den Draht ein als bei schnellem Stromverschwinden, wodurch eine solche Verschiebung der Kurve zustande kommen müßte. Ob man es wirklich nur mit einer zeitlichen Verschiebung zu tun hatte, konnte man prüfen, wenn man einen Draht mit anderer Abklingungskonstante untersuchte. Wenn auch dort keine Veränderung der Kurvenform, sondern nur eine rechtsseitige Verschiebung auftrat, waren die obigen Schlüsse gerechtfertigt. Ein Wismutdraht, dessen Nachwirkung eine sehr geringe Abklingungsgeschwindigkeit zeigte, mußte sich für unseren Zweck besonders eignen. An einem solchen Draht, über dessen Herstellung später (S. 53) zu berichten sein wird, wurden die in Tabelle 18 und Fig. 14 verzeichneten Werte gewonnen.

Der Widerstand des Wismutdrahtes betrug 8,7 Ohm, die Stromstärke bei allen 3 Abklingungskurven 0,66 Amp.

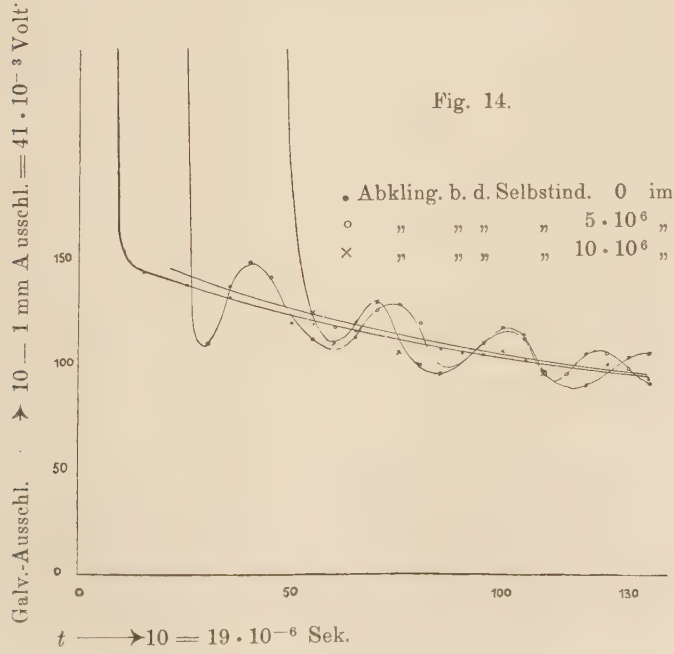


Fig. 14.

• Abkling. b. d. Selbstind. 0 im Kreise.
○ „ „ „ „ $5 \cdot 10^6$ „ „
× „ „ „ „ $10 \cdot 10^6$ „ „

Tabelle 18.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei einer zugeschalteten Selbstind. von		
	0 CGS	$5 \cdot 10^6$ CGS	$10 \cdot 10^6$ CGS
0	Stromausschalten		
15	144	—	—
20	—	—	—
25	139	—	—
30	—	110	—
35	132	137	—
40	—	148	—
45	120	143	149
50	—	120	150
55	119	112	125
60	—	118	110
65	115	113	120
70	—	126	130
75	—	128	106
80	—	120	100
85	106	120	96
90	—	106	125
95	—	106	110
100	—	118	106
105	102	116	112
110	—	96	95
115	—	96	110
120	—	106	90
125	—	106	100
130	—	98	103
135	92	90	115

Aus den Beobachtungsergebnissen geht hervor, daß der Nachwirkungseffekt von der Geschwindigkeit der Stromänderung im meßbaren Betrage ($5\,^0/_0$) nicht abhängig ist. Hingegen spricht die zeitliche Verschiebung der Kurven dafür, daß es das Fließen des eingeprägten Stromes und nicht seine Veränderung ist, was

die Nachwirkung hervorbringt. Es müßte dann der Effekt, dessen Abklingung man beobachtet, bereits während des Stromfließens bestehen. Da er aber proportional der Stromstärke ist, kann er für konstante Ströme vom Ohmschen Widerstand nicht getrennt werden. Also ist seine Feststellung während des Fließens konstanter Ströme (bei den hier in Betracht gezogenen Stromstärken) unmöglich.

5. Verteilung des Effektes im Draht.

Es galt nun, etwas Näheres über den Sitz des Effektes im Drahte zu erfahren. Zunächst bot sich da die Frage dar, ob die elektromotorische Kraft an den Lötstellen zwischen Wismutdraht und Kupferzuleitung auftrat. Eine Vermehrung der Lötstellen mußte dann entweder die Nachwirkung erhöhen oder zum mindesten grobe Unregelmäßigkeiten hervorrufen. Es wurden daher abwechselnd Wismut- und Kupferdrahtstückchen zusamengelötet, sodaß sich 20 Lötstellen ergaben. Der Wismutdraht hatte einen Widerstand von 27 Ohm und einen Querschnitt von 0,17 mm. An ihm wurden die in Tabelle 19, Kolonne I aufgeführten Galvanometerausschläge beobachtet, während ein Wismutdraht von gleichem Widerstand und Querschnitt in einem Stück bei sonst gleichen Verhältnissen die in Kolonne II stehenden Zahlen aufwies (s. nächste S.).

Es ist also erwiesen, daß die Lötstellen nicht Sitz des Effektes sind, sondern daß die Nachwirkung im Draht selbst vor sich geht.

Ein weiterer Versuch sei noch angeführt: Es wurde die zurückbleibende elektromotorische Kraft an einem Wismutdraht von 0,3 mm Querschnitt und einem Widerstand von 11,7 Ohm beobachtet und dabei Kolonne I in Tabelle 20 gefunden. Dann untersuchte man ein Drahtstück, welches von demselben Stück abgeschnitten war, wie die eben erwähnte Probe, das aber nur die halbe Länge besaß. Die sonstigen Versuchsbedingungen waren dieselben wie vorhin, vor allen Dingen war der Strom von gleicher Stärke. Man fand hierbei Kolonne II in Tabelle 20.

Tabelle 19.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge	
	I	II
0	Stromausschalten	
10	50	51
15	34	34
20	30	28
25	23	23
35	21	19
45	19	17
55	17	17
65	15	14
85	12	13
105	13	13
135	12	12

Tabelle 20.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge	
	I	II
0	Stromausschalten	
10	97	47
15	80	38
20	68	32
25	63	31
35	52	28
45	47	22
55	42	21
65	40	20
85	37	17
105	28	13
135	22	11

Ein Draht von der halben Länge zeigt also bei gleicher Stromstärke nur den halben Effekt. Die Nachwirkung verteilt sich demnach über die ganze Länge des Drahtes. Zu diesem Ergebnis war auf anderem Wege auch bereits Wolff gelangt.

Aus der Proportionalität des Effektes mit der Stromstärke und der Drahtlänge folgt, daß die an den Drahtenden zurückbleibende elektromotorische Kraft bei Drahtstücken von demselben Querschnitt (und derselben sonstigen Beschaffenheit) aber verschiedener Länge stets denselben Betrag erreicht, wenn die den eingeprägten Strom hervorrufende elektromotorische Kraft dieselbe ist und der Stromkreis keine Widerstände enthält außer dem des Wismutdrahtes. Dieser Umstand bot eine große Erleichterung bei den weiteren Versuchen, da die Drahtstücke nicht immer leicht in derselben Länge zu erhalten waren.

Einfluß des Querschnittes.

Nach den eben erwähnten Versuchen liefert jedes Längenelement des Drahtes einen Anteil zur Bildung der an den Drahtenden zurückbleibenden elektromotorischen Kraft, welche sich als arithmetische Summe der einzelnen Anteile darstellt. Wäre nun die Spannung der Wismutnachwirkung allein dadurch eindeutig festgelegt, daß ein Strom von bestimmter Dichte durch die beispielsweise würfelförmig angenommene mit Wismut erfüllte Volumeinheit hindurchgegangen ist, so würde bei gleicher Stromdichte nur die Anzahl der in der Stromrichtung aneinandergelegten Würfel maßgebend sein, während die Anzahl der senkrecht zu dieser Richtung nebeneinanderliegenden Würfel nur die Größe der entstehenden Elektrizitätsmengen bestimmen würde. Nun messen wir aber nach dem auf Seite 37 und 38 Geschilderten Spannungsdifferenzen und nicht Elektrizitätsmengen. Also müßten Drähte von verschiedenem Querschnitt — der Einfluß der Länge fällt nach Seite 45 und 47 heraus — bei gleicher elektromotorischer Kraft des eingeprägten Stromes dieselben Abklingungskurven ergeben. (Der Widerstand der Meßanordnung kommt, da er sehr gering ist, hier

nicht in Betracht, wodurch die Länge des Wismutdrahtes für die Abklingungskurve gleichgültig wird.) Es wurden nun Drähte von 4 verschiedenen Querschnitten (0,17 mm, 0,3 mm, 0,5 mm und 1,0 mm) untersucht. Die eingeprägte elektromotorische Kraft betrug 8,0 Volt. Folgende Abklingungskurven ergaben sich:

Tabelle 21.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge der Drahtquerschnitt betrug: 0,17 mm	0,3 mm	0,5 mm	1,0 mm
0	Stromausschalten			
10	18	88	32	—
15	13	77	28	49
20	11	66	22	47
30	9	57	19	40
40	8	49	17	38
50	7	45	14	33
60	6	40	12	30
80	4	32	10	28
100	2	28	10	23
130	—	21	7	20
180	—	16	4	18

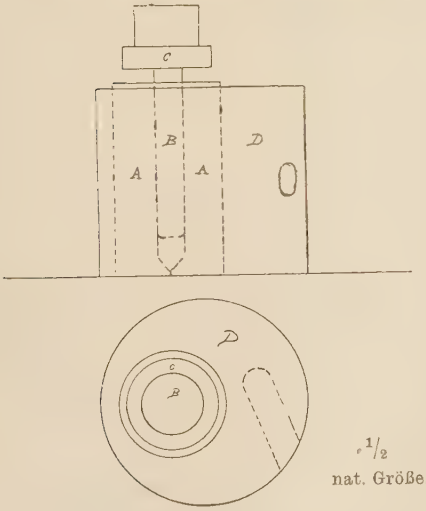
Sowohl der Betrag der zurückbleibenden elektromotorischen Kraft als auch die Abklingungsgeschwindigkeit sind bei den verschiedenen Drähten verschieden, doch so, daß keine deutliche Beziehung zum Querschnitt zu erkennen ist. Das Wismut als solches ist demnach nicht allein maßgebend für die Entstehung der Nachwirkung, sondern es spielen hier auch irgend welche Unterschiede in der Beschaffenheit des Wismuts eine Rolle. Dieser Umstand zeigte einen neuen Weg für weitere Untersuchungen: Aus der Art der Herstellung und aus der Beschaffenheit der Wismutfäden und der hervorgerufenen Beeinflussung der Nachwirkung mußten sich Schlüsse auf die Natur der letzteren ziehen lassen.

6. Einfluß der Struktur des Wismuts.

Die Untersuchungen des vorigen Abschnittes weisen darauf hin, daß die Beschaffenheit des Wismuts, vielleicht Struktur oder ähnliche Umstände, das Zurückbleiben einer elektromotorischen Kraft stark beeinflußt. Befestigt wurde dieser Schluß noch dadurch, daß die letzten von Hartmann und Braun bezogenen Wismutdrähte vom Querschnitt 0,3 mm die Nachwirkung in weit geringerem Grade aufwiesen als die älteren vom selben Querschnitt, sie betrug ungefähr nur den achten Teil des Effektes, der an den früher bezogenen Drähten beobachtet wurde. Änderungen in der Herstellungsweise konnten Hartmann und Braun nicht angeben; es empfahl sich also, selbst Drähte aus Wismut zu pressen und zu beobachten, welchen Einfluß Verschiedenheiten im Preßverfahren auf die Nachwirkung haben.

a) Gepreßte Wismutdrähte.

Zur Herstellung von gepreßtem Wismutdraht gibt bereits Matthiessen[1]) einen Weg an; ausführlich ist auch ein Verfahren bei Lenard[2]) beschrieben. Da das kristallische Wismut bei Temperaturen über 170° einigermaßen duktil wird, so bietet die Herstellung von Wismutdraht keine allzugroßen Schwierigkeiten. Man braucht das Wismut nur bei genügend hoher Temperatur durch eine enge Öffnung zu pressen. Die



$^1/_2$ nat. Größe.

Fig. 15.

[1]) Matthiessen, Pogg. Ann. **100**, p. 177, 1857.

[2]) Lenard, l. c.

bei den vorliegenden Versuchen benutzte Preßvorrichtung ist in Fig. 15 in Aufriß und Grundriß abgebildet.

A stellt den stählernen Preßzylinder dar, dessen genau zylindrische Öffnung am Boden in einem 0,4 mm weiten Loche ausmündet. In die Öffnung des Preßzylinders ist der stählerne Stempel B genau eingeschliffen. Er trägt an seinem Kopf einen Anschlagring C, welcher verhindert, daß sich der Stempel zu weit in den Zylinder hineinschiebt und sich in dessen konischem unteren Ende festrammt. Der Preßzylinder steckt exzentrisch in einem Messingmantel D, welcher einmal dazu dient, die Wärmekapazität des Systems zu erhöhen und dadurch eine bessere Konstanthaltung der Temperatur zu ermöglichen, und welcher außerdem noch die Einführung eines Thermometers gestattet. Eine genauere Temperaturbestimmung, als die auf diesem Wege erreichte, war zwecklos, da man ja nie genau die Temperatur des Wismuts erhalten konnte, denn diese erhöhte sich während des Pressens stark (bei starkem Druck konnte man es dahin bringen, daß der Draht abschmolz), und die Wärme teilte sich infolge der verhältnismäßig geringen Wärmeleitfähigkeit des Wismuts der Umgebung nur langsam mit. Die ganze beschriebene Vorrichtung wurde in die große Spindelpresse des Instituts eingesetzt und von deren Metallteilen durch Asbestzwischenlagen gegen Wärmeableitung geschützt. Geheizt wurde der Messingmantel D mit einer schräg dagegen brennenden Bunsenflamme. Die Wismutdrähte ließen sich bequem bis zu einer Länge von über 2 m herstellen.

Als Ausgangsmaterial diente beim Drahtpressen und auch bei den später noch zu beschreibenden Versuchen von Merck bezogenes Bismutum metallicum purissimum. Es zeigte den normalen Temperaturkoëffizienten der elektrischen Leitfähigkeit, welcher ja ein gutes Kriterium für die Reinheit des Wismuts ist.

Das Metall wurde in kleine Stückchen zerbrochen, diese in den Preßzylinder hineingeworfen und dann unter Erwärmen zusammengedrückt und durch das Preßloch hindurchgepreßt.

Zunächst wurde versucht, einen Einfluß der während des

Pressens herrschenden Temperatur festzustellen.[1]) Nachfolgende Tabelle zeigt einige Abklingungskurven, welche an Drähten mit verschiedenen Preßtemperaturen gewonnen wurden.

Tabelle 22.

Verschiebung d. Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei Drähten von der Preßtemperatur			
	170°	200°	225°	250°
0	Stromausschalten			
10	32	33	52	49
15	30	32	48	42
20	29	29	44	40
25	28	28	42	38
30	25	25	40	32
40	22	22	33	32
50	20	20	35	30
60	19	19	30	28
80	17	15	28	25
130	15	14	23	20
180	12	12	18	18
280	9	10	15	13
380	8	9	12	11

Die bei den höheren Temperaturen 225 und 250° hergestellten Drähte zeigen den Nachwirkungseffekt in stärkerem Maße als die beiden anderen Drähte mit niedrigeren Preßtemperaturen. Doch ist der aufgefundene Einfluß nicht so regelmäßig, daß man aus ihm weitere Schlüsse hätte ziehen können.

Da man jetzt verschiedene Drähte von gleichem Querschnitt und verschieden starker Nachwirkung hatte, war es geraten, die Beschaffenheit der Drähte unter dem Mikroskop zu prüfen. Es wiesen die Bruchflächen der Drähte sowohl bunt durcheinander gewürfelte Kristallbrocken auf als auch

[1]) Vergl. Lenard, l. c.

Stellen, an denen ein kristallisches Gefüge nicht mehr erkennbar war. In den Drähten nun, welche starke Nachwirkung zeigten, — sowohl in den Hartmann und Braunschen als auch in den selbstgefertigten — waren mehr Kristallbrocken zu erkennen, als in denen mit schwächerer Nachwirkung, sodaß es schien, als ob der Betrag der letzteren von der Anzahl der größeren kristallisch einheitlichen Teile des Drahtes abhinge.

War dieser Schluß richtig, so durfte ein Draht, welcher aus nur verschwindend kleinen Kristallbrocken aufgebaut war, einen nur ganz geringen Effekt aufweisen. Es wurde nun derartiger Wismutdraht aus demselben Metall wie der gepreßte Draht hergestellt, und zwar auf folgende Weise: Das Wismut wurde in einem Porzellanmörser vor dem Pressen zu feinem Staub zerrieben, was natürlich erst unmittelbar vor dem Pressen geschehen durfte, um der Oxydation keine Zeit zu lassen. Dieser Wismutstaub wurde in die Preßvorrichtung eingeschüttet und darin erwärmt und gepreßt. Beim Pressen zeigte sich, daß die Kräfte, welche nötig waren, um das Wismut durch das Preßloch hindurchzudrücken, erstaunlich größer waren, wenn man vom Pulver ausging, als wenn man Metallbrocken verarbeitete. Hiernach ist der Schluß wohl nicht von der Hand zu weisen, daß das kristallische Gefüge, vielleicht die ausgeprägten Spaltflächen, einen großen Anteil an der Duktilität des Wismuts haben.

Der aus Wismutpulver gewonnene Draht war äußerst spröde, es war beinahe unmöglich, ihn zu biegen. Seine Leitfähigkeit unterschied sich kaum von der des Drahtes, welcher aus Metallstückchen gepreßt war, sie betrug $7{,}6 \cdot 10^{-6}$ CGS, während sie beim letzteren $7{,}5 \cdot 10^{-6}$ bis $8{,}2 \cdot 10^{-6}$ CGS war. Unter dem Mikroskop betrachtet, zeigte die Bruchfläche ein regelmäßig feinkörniges Aussehen.

Wie erwartet, war an diesem Draht die Nachwirkung unmeßbar klein. — Man mußte sich hier beim Anlöten der Kupferzuleitungen sehr vorsehen, daß man den Wismutdraht nicht über seinen Schmelzpunkt erwärmte, denn sonst kristalli-

sierte das Metall aus und es trat eine Nachwirkung auf. Darum empfahl es sich, die Woodsche Legierung als Lot zu wählen.

Bei später zu beschreibenden Versuchen über die Abhängigkeit des Nachwirkungseffektes von der Temperatur wurde die Erfahrung gemacht, daß durch längeres starkes Erwärmen über 220° der Wismutdraht sich sehr veränderte; an dem erhitzt gewesenen Drahte war eine besonders starke Nachwirkung zu beobachten. Die Veränderung war eine dauernde, und eine zweite oder dritte Erwärmung hatte keinen Einfluß mehr. Diese Einwirkung der starken Erhitzung machte sich bei verschiedenen Drähten verschieden stark geltend. Am stärksten trat sie bei den Hartmann und Braunschen Drähten auf, während sie bei dem aus Pulver hergestellten Draht gerade nur noch wahrnehmbar war. Es seien einige Abklingungskurven angegeben.

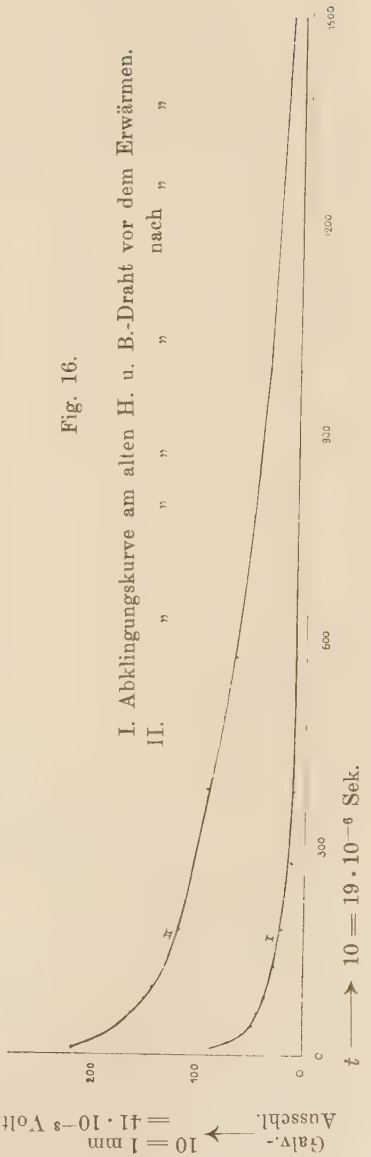


Tabelle 23.

Verschiebung d. Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei Hartmann und Braunschem Draht			
	alter		neuer	
	vor Erwärmen	nach Erwärmen	vor Erwärmen	nach Erwärmen
0	Stromausschalten			
10	87	220	10	—
20	70	198	10	82
30	58	188	9	72
40	53	172	8	66
50	49	170	6	62
60	46	164	4	58
80	39	152	3	52
100	34	146	—	48
130	29	131	—	41
180	21	119	—	34
280	15	105	—	27
380	12	93	—	19
580	10	63	—	13
780	8	49	—	12
980	8	38	—	9
1480	7	17	—	3
Widerstand	13,4	13,3	2,2	2,1 Ω

Wie aus den hinzugefügten Zahlen zu erkennen ist, hat sich durch die Erwärmung der Widerstand stets ein wenig verringert. Ein Vergleich der Bruchflächen der Drähte vor und nach dem Erwärmen zeigte, daß durch das letztere das kristallische Gefüge einheitlicher geworden war. In Drähten, in denen die Kristallbrocken alle fast gleiche Größe hatten, konnte sich nun diese Veränderung weniger ausgeprägt vollziehen als in solchen, in denen neben einigen großen viele verhältnismäßig kleine Kristallstückchen lagen, denn im ersteren Falle störten die einzelnen Kristalle einander weit mehr bei ihrer Vergrößerung als im letzteren. Es wird so begreiflich,

Tabelle 24.

Verschiebung d. Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei selbstgefertigtem Wismutdraht			
	aus Metallstücken		aus Pulver	
	vor Erwärmen	nach Erwärmen	vor Erwärmen	nach Erwärmen
0	Stromausschalten			
20	55	65	2	8
30	47	53	—	—
40	42	49	—	—
50	38	46	—	—
60	34	44	—	—
70	31	42	—	—
80	29	40	3	6
90	28	38	—	—
100	26	37	—	—
110	24	36	—	—
120	24	35	—	—
130	22	34	3	3
150	18	31	—	—
180	18	30	—	—
Widerstand	1,8	1,7	1,7	1,5 Ω

warum der alte Hartmann und Braunsche Draht mit seinen großen Kristalltrümmern den Einfluß der Erwärmung weit mehr erfuhr als die Drähte, in denen Brocken von ziemlich gleicher Größe nebeneinanderlagen, wie dies am ausgeprägtesten bei dem aus Pulver hergestellten Draht der Fall ist.

Es zeigen also auch die eben beschriebenen Versuche über den Einfluß längerer starker Erwärmung, daß die Nachwirkung um so stärker auftritt, je größere Teile des Drahtes großzügig kristallisches Gefüge aufzuweisen haben.

b) Wismutfäden in Glasröhren.

Alle bisher erwähnten Versuche über den Zusammenhang der Beschaffenheit des Wismutdrahtes mit der Nachwirkungs-

erscheinung weisen darauf hin, daß die kristallische Struktur eine wichtige Bedingung für das Zurückbleiben einer elektromotorischen Kraft im Wismutdraht ist. Stellte man nun Wismutfäden so her, daß bei ihnen die Kristalle nicht zertrümmert wurden, wie es beim Pressen des Drahtes geschah, sondern daß sie sich nach Möglichkeit ausbilden konnten, so mußte man dann eine besonders starke Nachwirkung beobachten können. Es wurde nun zunächst folgendes Verfahren angewandt:

Wismut wurde in einem kleinen tiefen Porzellantiegel geschmolzen, die auf dem Metall befindliche Oxydschicht sorgfältig entfernt und dann ein mäßig angewärmtes (ungefähr 200°) Glaskapillarrohr, welches mit Äther und Alkohol gut gereinigt worden war, in das Wismut getaucht. Nun saugte man mit der Wasserluftpumpe rasch das weit über den Schmelzpunkt erwärmte Metall in das Kapillarrohr hinein und ließ es darin erstarren. Die auf diese Weise erhaltenen Wismutfäden hatten meist eine Länge von 20 cm. Die lichte Weite des Glasrohres betrug meist 0,7 mm, die Wandstärke 2 mm.

Als Beispiele für die Nachwirkung an so hergestellten Wismutfäden seien die Abklingungskurven in Tabelle 25 angeführt. Zum Vergleich ist die Abklingung an einem Hartmann und Braunschen Draht mit angegeben.

Die Nachwirkung ist an diesen Fäden eine ganz bedeutende; es ist vor allem die Abklingungsgeschwindigkeit sehr gering. Mit der Brücke und dem Telephon gemessen ist hier der Wechselstromwiderstand über 1% kleiner als der Gleichstromwiderstand. Die mikroskopische Betrachtung der Bruchfläche eines solchen Wismutfadens zeigt eine scharf ausgeprägte Schichtung von einzelnen Kristallschuppen.

Erwärmte man bei der eben geschilderten Herstellung der Wismutfäden das Glasrohr an einer Stelle stärker als an den übrigen, so blieb in solchen Teilen das Wismut länger flüssig als in der Umgebung, es befand sich als flüssiges Metall in einem allseitig abgeschlossenen Raume. Beim Erstarren dehnt sich nun aber das Wismut um 3% seines Volumens im flüssigen Zustande aus. Daher zersprang meist beim Erstarren

Tabelle 25.

Verschiebung d. Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge				
	H. u. Br.-Draht	Wismutfäden in Kapillarrohr			
	Querschnitt:				
	0,3	0,7	0,7	0,7	0,3
0	Stromausschalten				
10	87	70	75	98	—
20	70	72	75	98	98
30	58	70	72	98	93
40	53	71	70	93	90
50	49	68	69	92	88
60	46	68	70	92	85
80	39	68	69	91	80
100	34	68	67	91	78
130	29	68	65	88	70
180	21	68	62	88	66
280	15	68	59	82	53
380	12	58	53	81	49
580	10	49	51	60	39
780	8	44	45	58	30
980	8	39	38	51	22
1480	7	29	29	35	15
1980		18	18	23	9
Widerstand:		0,81	0,98	0,71	5,18 Ω
Länge:		22,0	22,0	16,5	21,0 cm

Elektromotorische Kraft des eingepr. Stromes 8 Volt.

des Metalles das Rohr an den stärker erwärmten Stellen. Blieb es aber unverletzt, so hatte man in diesem Rohrstück Wismut, welches unter sehr hohem Druck erstarrt war. Die zurückbleibende elektromotorische Kraft war an solchen Stücken sehr klein. Um festzustellen, ob dem Druck die Verringerung der Nachwirkung zuzuschreiben war, wurden die betreffenden Kapillarrohre mit Wismut bis zur Hälfte am Schleifstein ab-

geschliffen, sodaß das Metall bloß lag. Der Effekt wurde nun gemessen. Darauf erhitzte man das Glas mit dem Wismut bis zum Schmelzen des letzteren. Nach dem Erstarren- und Erkaltenlassen wurde der Effekt wieder gemessen. Er zeigte sich dann bedeutend größer als vor dem Umschmelzen. Das Erwärmen und Abkühlen wurde im Luftbade bei langsamen Temperaturänderungen vorgenommen, um Störungen durch zu schnelle Abkühlung zu vermeiden. Als Beispiel sei ein Abklingungskurvenpaar angeführt.

Tabelle 26.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge vor dem Umschmelzen	nach dem Umschmelzen
0	Stromausschalten	
10	9	62
20	12	62
30	15	62
40	16	62
50	16	62
70	18	60
100	18	59
150	18	59
200	15	59
250	15	58
300	14	56
350	13	55
400	12	53

Elektromotorische Kraft des eingepr. Stromes 8 Volt.

In der vor dem Umschmelzen gewonnenen Kurve ist ein ausgeprägtes Maximum zu erkennen. Durch Veränderung der Stromstärke ließ sich erweisen, daß dies von der Überlagerung eines zweiten Effektes von entgegengesetztem Vorzeichen herrührt, der sich mit der Stromstärke in anderem Maße ändert als unser in Rede stehender Effekt.

c) In Glas ausgezogenes Wismut.

Es wurde noch ein weiteres Verfahren zur Herstellung von Wismutfäden angewandt, mit Hilfe dessen man bedeutend dünnere Fäden herstellen konnte als auf dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Wege. Man brauchte nun bei der Untersuchung der dünnen Fäden zur Erzielung beobachtbarer Effekte nicht so hohe Stromstärken anzuwenden wie bei den dickeren Proben, da es ja im wesentlichen auf die Stromdichte ankommt. Die Herstellung dieser dünnen Fäden geschah in

Tabelle 27.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge	
0	Stromausschalten	
10	62	50
20	61	49
30	60	49
40	59	48
50	58	48
70	54	47
90	52	46
120	50	46
170	48	43
220	45	38
270	43	38
370	40	33
470	37	30
670	20	26
870	28	22
1070	23	19
1570	15	12
Widerstand:	1,7 Ohm	1,08 Ohm
Elektromot. Kraft d. eingepr. Stromes:	4 Volt	6 Volt

folgender Weise: In einem Glasrohr schmolz man Wismut, entfernte die Luftblasen aus dem Metall und zog beides, Glasrohr und flüssiges Wismut, zu dünnen Fäden aus. Es ist dies Verfahren ähnlich dem, welches Schnorr v. Carolsfeld anwandte, nur wurde hier davon Abstand genommen, das auszuziehende Glasrohr durch Daraufschmelzen mehrerer weiterer Rohre zu verstärken, da gefürchtet werden mußte, dadurch Störungen infolge des Druckes des Glases zu erhalten. Die so hergestellten Stücke hatten meist eine Länge von 5—8 cm und einen Widerstand von ungefähr 1 Ohm. Es seien die an zwei Wismutproben, welche auf die oben geschilderte Art hergestellt waren, gewonnenen Abklingungskurven angegeben (s. vorige Seite, Tab. 27).

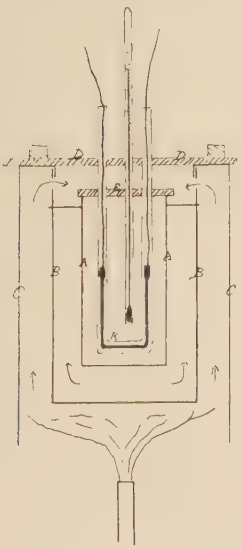
Man findet hier eine starke langsam abklingende Nachwirkung, welche in bezug auf Stärke und Abklingungsgeschwindigkeit der Nachwirkung an den Wismutfäden in Glaskapillaren ähnlich ist.

d) Flüssiges Wismut.

Wenn die kristallische Struktur des Wismuts eine notwendige Bedingung für das Auftreten der Nachwirkung ist, so darf letztere beim flüssigen Wismut nicht vorhanden sein. Es war also von Interesse, auch das flüssige Wismut zu untersuchen.

Für die Versuche mit flüssigem Wismut wurde ein leicht handliches Luftbad (Fig. 17) konstruiert, welches ermöglichte, ohne großen Energieaufwand das Metall im flüssigen Zustand auf konstanter Temperatur zu erhalten. Dieses Luftbad bestand aus 2 ineinandergesteckten zylindrischen, oben offenen Metallgefäßen A und B, von denen das äußere, B, von unten durch einen Bunsenbrenner geheizt wurde. Zur besseren Wärmeausnützung und zum Schutz gegen abkühlende äußere Luftströmungen war es in einigem Abstand noch mit einem Schwarzblechmantel C umgeben, welcher mit seinem oberen, nach innen weit umgebogenen Rande auf dem Gefäße B ruhte. Der untere Rand von C reichte weit über das Ende des Ge-

fäßes B hinab, wodurch die vom Brenner herkommende heiße Luft gezwungen wurde, in dem Raume zwischen B und C hinaufzusteigen. Oben war die ganze Vorrichtung mit einem durch Bleigewichte aufgepreßten Asbestdeckel D abgeschlossen, und so mußte die zwischen B und C aufsteigende Luft durch Lücken im Rande von B nach B hineindringen. Dort erwärmte sie gemeinsam mit der vom Boden von B aufsteigenden heißen Luft den oberen Teil von A. Dies letztere war oben ebenfalls durch einen Asbestdeckel E abgeschlossen.



$^1/_6$ nat. Größe.
Fig. 17.

Auf diese Weise war auch bei großer Erwärmung eine in allen Teilen von A gleiche Temperatur gewährleistet, was nötig war, um im Wismut nicht Temperaturverschiedenheiten und dadurch thermoelektrische Störungen zu bekommen.

Das Wismut befand sich im Gefäß A in einem U-förmig umgebogenen Kapillarrohre K, dessen lichte Weite 0,7 mm und dessen Länge insgesamt 15 cm betrug. An die beiden oberen Enden von K waren weitere Glasrohre angeschmolzen, welche durch die beiden Asbestdeckel D und E mittelst Asbestwatte abgedichtet hindurchgeführt wurden. Diese beiden Glasröhren, welche an ihrem oberen Ende mit Asbestwolle verstopft waren, enthielten die Kupferdrahtzuleitungen zum flüssigen Wismut. Ein Quecksilberthermometer wurde ebenfalls abgedichtet durch die beiden Deckel nach A eingeführt.

Vor dem Gebrauch wurde das Glasrohr mit Äther und Alkohol gut gereinigt. Darauf wurde es in das Luftbad hineingesetzt und dann warf man das Wismut in kleinen Körnchen in eins der angeschmolzenen weiteren Rohre hinein und führte die beiden blankgeputzten Kupferzuleitungen in beide Schenkel

ein. Die obere Mündung der letzteren verstopfte man, um die Zufuhr kalter Luft zu verhindern, mit Asbestwolle und heizte den Apparat mit dem Bunsenbrenner an. Das Wismut schmolz nun und erfüllte die Kapillare und einen Teil der angeschmolzenen weiteren Glasrohre, wo die Kupferzuleitungen in das flüssige Metall hineintauchten.

Um zu sehen, ob das geschmolzene Metall und die eintauchenden Drähte einen zusammenhängenden Leitungsweg bildeten, waren zwischen diese beiden Drähte ein Element und ein Galvanoskop eingeschaltet, welch letzteres durch seinen Ausschlag anzeigte, ob das flüssige Wismut die Leitung zwischen den beiden Kupferzuführungen hergestellt hatte. War der Weg durch das flüssige Metall geschlossen, so wurden, nachdem natürlich Element und Galvanoskop entfernt waren, die in das Wismut führenden Kupferdrähte an Stelle des Versuchsdrahtes an die Meßanordnung angeschlossen.

Ehe man nun das flüssige Wismut untersuchen konnte, mußte man feststellen, ob die Übergangsstellen vom Wismut zum Kupfer nicht etwa Sitz von störenden thermoelektrischen Kräften waren. Man konnte dies ausführen, indem man eine Messung vornahm, genau wie zur Bestimmung der Nachwirkung, wobei man aber die Akkumulatorenbatterie abgeschaltet hatte. Es zeigte hierbei der Kondensator keine meßbare Ladung; demnach herrschten an den Übergangsstellen keine thermoelektrischen Kräfte, welche die Messungen hätten beeinflussen können.

Schaltete man nun die Akkumulatorenbatterie (8 Volt) wieder ein und prüfte, ob eine Nachwirkung vorhanden war, so zeigte abermals das Galvanometer keinen Ausschlag, ein Ergebnis, welches nach den früheren Versuchen zu erwarten war.

Unterbrach man die Heizung und ließ das Wismut in der Kapillare erstarren und untersuchte man dann das erstarrte Metall ohne an der Versuchsanordnung irgend etwas geändert zu haben, so zeigte dieses die Nachwirkung. Es wurden z. B. folgende Abklingungskurven gewonnen:

Tabelle 28.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge	
0	Stromausschalten	
20	33	15[1])
30	32	15
40	30	19
50	30	20
60	29	20
80	25	21
110	25	21
160	22	22
210	19	21
260	18	19

Elektromotorische Kraft des eingeprägten Stromes: 8 Volt.

Die Nachwirkung ist hier nicht sehr groß. Es erklärt sich dies aus dem S. 57 Erörterten. Es seien hier auch noch als Beispiel die Widerstände des Wismuts im flüssigen Zustande und nach dem Erstarren angegeben, welche an einem Versuch gemessen wurden:

Temperatur	300°	18°
Widerstand	0,59	0,40 Ω.

Daß im flüssigen Zustande das Wismut keine Nachwirkung zeigen würde, war nach den früheren Untersuchungen nahe gelegt. Wollte man aber aus dem Verhalten des geschmolzenen Metalles schließen, daß das Zurückbleiben der elektromotorischen Kraft im Wismut an die kristallische Struktur gebunden wäre, so hätte man übersehen, daß ja bei Steigerung der Temperatur der Effekt sich verringern und schon beim noch festen Metall bei höheren Temperaturen verschwindend kleine Werte annehmen könnte. Es mußte, um aus den Versuchen über das

[1]) Wegen des Maximums in dieser Kurve vergl. die Bemerkung auf S. 58, Zeile 6 von unten u. folgende.

flüssige Wismut etwas folgern zu können, noch die Abhängigkeit des Effektes von der Temperatur berücksichtigt werden. Es sei darum bereits hier das Ergebnis später zu beschreibender Untersuchungen angeführt: Bei Erhöhung der Temperatur (beobachtet bis 250°) nähert sich die Nachwirkung asymptotisch einem größten Betrage. Es verschwindet also der Effekt erst beim Schmelzen des Metalles.

So weist also auch das Verhalten des geschmolzenen Wismuts darauf hin, daß das Auftreten der Nachwirkung an stark kristallische Struktur gebunden ist.

e) Einfluß der Richtung der Kristallachse.

Wenn nun die kristallische Struktur notwendig zum Entstehen der Nachwirkung ist, so bietet sich sofort die Frage dar, ob das Auftreten des Effektes daran gebunden ist, daß die Kristalle mit ihren Achsen verschieden gegeneinander gelagert sind, wie es in den Wismutdrähten tatsächlich der Fall ist: Es wurden daher aus einem Wismutstück mit ausgeprägter Struktur Säulchen herausgebrochen, deren Achsen parallel den ausgeprägtesten Spaltflächen im Metall waren.

Diese kleinen Stäbchen hatten einen Querschnitt von ungefähr $^1/_2$ mm und meist eine Länge von 1 cm. Sie wurden mit Klebwachs auf eine Glasplatte aufgekittet und an ihren Enden zusammengelötet, sodaß sie einen 10 cm langen Wismutstab bildeten. In allen Teilen hatten die Kristallachsen dieselbe Lage. Dazu genügte es natürlich nicht, daß man die einzelnen Säulchen der Länge nach aneinander lötete, denn dadurch war ja erst eine Richtung festgelegt. Um die Kristallstäbchen in der richtigen Lage aneinandersetzen zu können, wurde, bevor man die Stäbchen aus dem ganzen Stück herausbrach, auf diesem mit Farbe ein Streifen dort, wo das eine Ende aller herauszubrechenden Stäbchen lag, aufgezeichnet. Die Reste des Streifens fanden sich dann auf den einzelnen Säulchen wieder und bildeten Marken für deren richtige Lage. Das Zusammenlöten der Stäbchen mußte, um das Wismut nicht zu

sehr zu erwärmen und dadurch zum Umschmelzen zu bringen, vorsichtig mit Woods Metall ausgeführt werden.

Auch an dem eben beschriebenen Wismutstabe zeigte sich die Nachwirkung; es wurde folgende Abklingungskurve gefunden:

Tabelle 29.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge
0	Stromausschalten
20	26
30	27
40	26
50	24
60	23
80	22
100	22
130	21
180	20
280	18
380	15
580	12
780	12
980	10
1480	6

Elektromotorische Kraft des eingepr. Stromes 8 Volt.

Zweierlei lehrt uns diese Abklingungskurve. Der Umstand erstens, daß die Nachwirkung vorhanden ist, läßt erkennen, daß letztere nicht an verschiedene gegenseitige Richtung der Kristallachsen in verschiedenen Teilen des Wismutfadens gebunden ist. Weiterhin muß aber auffallen, daß der Effekt recht gering ist, obgleich doch die Struktur so gut als möglich ausgebildet ist. Es hängt demnach die Nachwirkung von einer Eigenschaft des kristallischen Wismuts ab, welche nach verschiedenen Richtungen des Kristalles vorhanden ist, die man aber geringer

ausgeprägt findet, wenn man parallel den Spaltflächen im Metall fortschreitet, stärker hingegen, wenn man ungefähr senkrecht zu dieser Richtung sich bewegt. Eine solche Eigenschaft ist nun die Spaltbarkeit selbst. Diese als bedeutungsvoll für unseren Effekt anzunehmen, legt dessen Abhängigkeit vom äußeren Druck nahe. Wir finden nämlich im Wismut in Richtung der Spaltflächen Schichten geringer Dichte eingelagert, und auf solche Schichten geringer Widerstandsfähigkeit muß der auf das Metall ausgeübte Druck besonders stark zusammenpressend einwirken, sofern nicht gerade die Richtung des Druckes in die Ebene der Schichten fällt. Dies ist aber bei den Drähten nicht der Fall, denn die Spaltflächen liegen fast immer schiefwinklig zur Drahtachse, während der Druck senkrecht zu dieser Richtung erfolgt.

Die eben erwähnte Schichtung ist nun am stärksten ausgeprägt parallel den Flächen, nach denen das Wismut am leichtesten spaltet. Wenn wir nun annehmen, diese Schichtung begünstige die Entstehung unserer Nachwirkung, so würde der Einfluß des Druckes und der Einfluß der Lage der Kristallachsen zur Stromrichtung erklärlich.

7. Einfluß der Temperatur.

Der Temperaturkoeffizient hat sich schon oft als ein sehr brauchbarer Wegweiser oder Prüfstein bei der Erforschung der Zusammenhänge unter den physikalischen Erscheinungen erwiesen. Es durfte darum eine Untersuchung der Wismutnachwirkung die Bestimmung ihrer Abhängigkeit von der Temperatur nicht versäumen.

Die Untersuchungsmethode blieb natürlich ganz wie bisher, nur mußte dafür Sorge getragen werden, daß das Wismut auf eine beliebig wählbare konstante Temperatur gebracht werden konnte.

Eine Veränderung der Temperatur des Wismutdrahtes bringt nun aber stets eine starke Widerstandsänderung in ihm hervor. Wegen der Notwendigkeit, möglichst viele Versuchs-

bedingungen konstant zu halten, vor allem auch wegen der Deutung der Galvanometerausschläge (vergl. S. 29), war es wünschenswert, daß für diese Widerstandsänderung ein Ausgleich geschaffen wurde. Das geschah, indem man direkt hinter den Wismutdraht einen gradlinig ausgespannten Manganindraht schaltete. Auf diesem lief eine Klemmschraube, die es gestattete, eine beliebige Länge des Drahtes als Kompensationswiderstand zum Wismutdraht hinzuzuschalten.

Der Wismutdraht mit dem hinzugeschalteten Kompensationsdraht konnte mittelst Quecksilberkontakte bequem in eine Wheatstonesche Brücke eingefügt werden. Hatte man bei einer bestimmten Temperatur des Versuchsdrahtes die Brücke so eingestellt, daß das Brückengalvanometer in der Nullage blieb, so mußte es bei anderer Temperatur durch seinen Ausschlag eine Widerstandsänderung anzeigen. Diese glich man aus, indem man die Klemmschraube auf dem Manganindraht so verschob, daß das Galvanometer in die Ruhelage zurückkehrte. Bei der Untersuchung der Nachwirkung mußte man natürlich die Brückenanordnung vom Versuchsdraht abschalten, da man sonst grobe Störungen infolge von Selbstinduktionswirkungen bekam.

Solange nun bei den Beobachtungen die Summe der Widerstände des Wismutdrahtes und des zugeschalteten Manganindrahtes dieselbe blieb, herrschte, wenn man in der Versuchsanordnung keine sonstigen Änderungen traf, im Versuchsdraht stets dieselbe Stromstärke. Dies war aber nötig, wenn man die Versuchsergebnisse bei verschiedenen Temperaturen mit einander vergleichen wollte.

Bei den Versuchen über den Einfluß der Temperaturen oberhalb Zimmertemperatur befand sich das Wismut in dem auf S. 60 beschriebenen Luftbade. Die tieferen Temperaturen wurden von einem Ätherbad[1]) geliefert, welches durch hinein-

[1]) Alkohol verursachte infolge seiner durch das aufgenommene Wasser hervorgerufenen Leitfähigkeit Störungen, welche in scheinbarer Vergrößerung des Effektes bestanden.

geworfenen Kohlensäureschnee bis zu dem gewünschten Betrage abgekühlt wurde. Das Bad blieb lange Zeit auf konstanter Temperatur, denn es befand sich in einem (15 cm weiten und 20 cm hohen) Dewarschen Gefäß, welches mit einem Asbestdeckel verschlossen war, sodaß warme Luftströmungen abgehalten wurden. Das zu untersuchende Wismut tauchte bis weit über die Lötstellen in den abgekühlten Äther ein. Es war in einiger Entfernung von einem Metallzylinder umgeben. Dieser hatte einmal die Aufgabe, den zerbrechlichen Draht vor den heftigen Flüssigkeitsbewegungen zu schützen, welche beim Kohlensäureeinwerfen auftraten, und er sollte außerdem noch einen beständigen leichten Wärmeausgleich zwischen den verschiedenen Flüssigkeitsschichten ermöglichen.

Es wurden auch Versuche bei der Temperatur der flüssigen Luft vorgenommen. Letztere befand sich hierbei in einem 5 cm weiten Dewarschen Gefäß und das zu untersuchende Metall wurde direkt in sie hineingetaucht.

Sowohl Wismutdraht als auch das im Glasmantel befindliche Metall wurden untersucht. Der Wismutdraht war bifilar auf ein Glimmerkreuz gewickelt, sodaß ein leichter Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfinden konnte. Die stromzuführenden Kupferdrähte, die zwecks Isolation durch Glasröhren geleitet waren, wurden an den Wismutdraht mit Wismut angeschmolzen; Zinnlot konnte hier nicht verwendet werden, da die Versuchstemperaturen teilweise über dessen Schmelzpunkt lagen. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, die Lötstellen so nahe als möglich aneinanderzurücken, um keine Störung durch thermoelektrische Ströme zu erhalten.

Es wurden nun Beobachtungen bei verschiedenen Temperaturen vorgenommen, wobei auch nach der auf S. 62 beschriebenen Methode festgestellt wurde, daß keine thermoelektrischen Kräfte sich geltend machten. Es seien hier die Abklingungskurven, welche an einem Hartmann und Braunschen und an einem selbstgefertigten Draht beobachtet wurden, angegeben.

Tabelle 30.

Hartmann und Braunscher Draht.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Temperaturen					
	180°	140°	100°	20°	—13°	—69°
0	Stromausschalten					
10	89	89	88	87	77	47
20	79	75	76	71	63	39
30	74	68	65	62	54	33
40	67	62	58	54	49	29
90	49	44	40	38	31	18
140	36	32	28	26	20	12

Tabelle 31.

Selbstgefertigter Draht.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Temperaturen						
	205°	148°	20°	—5°	—40°	—75°	—192°
0	Stromausschalten						
20	67	65	62	59	49	37	0
30	59	58	53	54	44	31	0
40	52	52	48	47	40	28	0
50	48	48	43	41	35	25	0
60	46	45	40	41	33	21	0
70	42	41	37	35	30	19	0
80	42	40	36	34	28	19	0
90	39	38	33	31	25	18	0
100	38	36	30	29	24	18	0
110	35	33	28	29	22	17	0
120	33	32	27	24	22	15	0
130	32	30	26	22	20	14	0
150	30	28	23	21	19	14	0
180	28	25	21	19	17	12	0

Die an beiden Drähten gewonnenen Ergebnisse stehen in gutem Einklang miteinander. Die Größe der zurückbleibenden elektromotorischen Kraft sinkt mit der Temperatur, bei hohen Temperaturen sehr langsam, bei tieferen rascher.

Bei stärker ausgeprägter kristallisch einheitlicher Struktur des Wismuts äußert sich der Temperatureinfluß in wenig anderer Weise als bei den angeführten Versuchen. So zeigten ein durch Erwärmen umgewandelter Hartmann und Braunscher Wismutdraht, ein ebenso behandelter selbstgefertigter Draht und schließlich ein aus Kristallstäbchen zusammengelöteter Wismutfaden folgende Abklingungskurven.

Tabelle 32.

Umgewandelter Hartmann und Braunscher Draht.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Temperaturen					
	235°	140°	20°	−6°	−30°	−68°
0	Stromausschalten					
20	138	138	145	136	118	88
30	130	129	138	134	110	82
50	123	122	129	126	102	78
80	112	114	119	112	92	70
100	110	108	113	107	90	67
130	102	102	106	100	82	60
180	97	94	97	88	72	56
230	88	90	88	82	66	50
280	84	84	81	75	62	44
380	72	70	68	62	50	40
580	58	55	53	47	40	30
780	48	42	43	40	30	22
980	41	36	34	31	26	20
1480	27	20	20	19	18	12

Der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes war an diesem Draht anormal groß ($4{,}6 \cdot 10^{-3}$), womit vielleicht das etwas abweichende Verhalten der Nachwirkung bei höheren Temperaturen zusammenhängt.

Tabelle 33.
Umgewandelter selbstgefertigter Draht.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Temperaturen						
	230°	130°	20°	—9°	—45°	— 65°	— 192°
0	Stromausschalten						
20	72	73	72	65	54	44	0
30	62	62	61	56	46	42	0
40	58	57	56	51	43	35	0
50	54	52	52	48	40	31	0
60	52	50	49	44	38	29	0
70	50	48	47	42	34	28	0
80	47	46	44	41	33	28	0
90	46	43	42	39	32	27	0
100	44	42	41	38	32	25	0
110	42	40	39	37	28	24	0
120	41	40	38	36	27	23	0
130	40	39	37	35	27	22	0
150	38	37	34	34	25	20	0
180	35	35	32	29	22	18	0
280	30	28	25	23	19	—	0

Tabelle 34.
Wismutfaden aus Kristallstäbchen.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Temperaturen			
	+20°	—14°	—43°	—70°
0	Stromausschalten			
20	46	46	46	42
40	48	46	42	39
60	49	43	40	37
80	48	42	38	34
100	46	41	38	36
120	40	38	38	35
140	40	36	38	32
160	40	34	37	33

(Fortsetzung der Tabelle auf nächster Seite.)

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Temperaturen			
	+20°	−14°	−43°	−70°
180	38	35	34	30
230	35	35	32	28
280	33	33	30	25
380	32	30	28	22
480	30	27	25	22
680	22	20	20	18
880	18	16	18	17

Es wurden auch noch Versuche über den Temperatureinfluß vorgenommen, bei welchen sich das Metall in einem Glasmantel (vgl. S. 55 und S. 59) befand, und zwar wurde untersucht ein 10 cm langer Wismutfaden in einem Kapillarrohr (Widerstand bei 20° Celsius 0,5 Ohm) und ein in Glas ausgezogener Wismutfaden (vom Widerstand 1,08 Ohm bei 20° Celsius).

Tabelle 35.

Wismut im Kapillarrohr.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Temperaturen			
	+200°	+20°	−62°	−192°
0	Stromausschalten			
20	12	22	—	13
40	12	25	32	12
60	14	28	32	6
80	14	25	32	4
100	12	23	30	2
120	12	22	31	1
140	12	22	30	1
160	12	22	30	0
180	12	21	28	0
280	11	20	26	0
380	9	19	22	0
480	9	15	18	0
680	9	13	16	0
880	9	12	14	0

Tabelle 36.

Wismut in Glas ausgezogen.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Temperaturen						
	230°	140°	20°	— 14°	— 45°	— 68°	— 192°
0	Stromausschalten						
30	22	38	49	60	63	70	33
40	21	38	49	60	61	66	30
60	22	38	48	54	58	61	28
80	21	40	47	56	53	56	28
130	20	35	46	50	51	55	23
180	19	33	43	41	47	50	22
280	18	30	38	37	42	41	18
380	17	28	33	31	37	37	18
480	16	24	30	28	34	35	15
680	16	22	26	25	28	27	13
880	13	18	22	20	20	20	11
1080	12	17	19	15	10	18	9

Bei den eben angeführten Versuchen steigt die Nachwirkung, wenn die Temperatur von 230° abnimmt, bei der Temperatur der flüssigen Luft aber ist die zurückbleibende elektromotorische Kraft wieder kleiner als bei — 68°. Offenbar hat man es hier mit der Übereinanderlagerung zweier Effekte zu tun. Über den bei den Wismutdrähten beobachteten Temperatureinfluß lagert sich noch die Wirkung der Veränderung des auf dem Metall lastenden Druckes des Glases. Da Glas als Ausdehnungskoeffizient $60 \cdot 10^{-7}$ und Wismut $128 \cdot 10^{-7}$ hat, so müssen bei den in Betracht kommenden Temperaturunterschieden erhebliche Änderungen des Druckes entstehen, wodurch sich die scheinbare Umkehr der Temperatureinwirkung erklärt: und so finden wir auch gleichzeitig eine Bestätigung der auf S. 56 und 66 gezogenen Schlüsse über die Einwirkung des Druckes auf die Nachwirkung.

8. Einfluß eines Kurzschlusses nach dem Stromausschalten.

Wollte man die elektrische Nachwirkung am Wismut auf bekannte Vorgänge zurückführen, so war die Beantwortung der Frage von großer Wichtigkeit, in welchem Maße die Spannungsdifferenz an den Enden des Wismutdrahtes von etwa im Draht angesammelter wahrer Elektrizität bedingt wird. Es legen ja bereits die Versuche über den Einfluß der Größe der Meßkapazität nahe, daß wir es nicht allein mit der Aufspeicherung eines beschränkten Elektrizitätsquantums zu tun haben. Aber die Wichtigkeit dieses Punktes erforderte es, daß genauere Untersuchungen angestellt wurden.

Zunächst wurden Versuche vorgenommen, bei denen der Gedankengang der folgende war: Nach dem Abschalten des eingeprägten Stromes wurden sofort beide Enden des Wismutdrahtes durch einen Draht von geringem Widerstand verbunden und, nachdem dieser Kurzschluß wieder aufgehoben war, wurde die Abklingungskurve, welche sich nach dem Kurzschluß ergab, aufgenommen.

Um den Kurzschluß mit der erforderlichen Schnelligkeit herstellen zu können, brauchte man einen Schließungskontakt, welcher mit der gleichen Sicherheit arbeitete, wie die Öffnungskontakte. Es wurde, da bei Benutzung der am Pendel befindlichen Fallschließungskontakte Unregelmäßigkeiten zu befürchten waren, ein ähnlicher Kontakt, wie einer auf S. 26 beschrieben ist, hergestellt. Nur mußte hier dafür gesorgt werden, daß der Kontakt auch bei längerem Schluß nicht abklirrte. Man erreichte das dadurch, daß man auf den am fallenden Pendel befindlichen Stahlbolzen ein 1 mm starkes Gummiplättchen, kittete und auf dieses ein $^1/_3$ mm starkes Stahlplättchen, welch letzteres die eine Kontaktfläche vorstellte, während die andere von der Nase des Fallhebels, wie bei dem auf S. 26 beschriebenen Kontakt, geliefert wurde. Die Gummiunterlage verhinderte, daß bei kleinen elastischen Deformationen starke elastische Kräfte auftraten, welche dem Fallhebel so große Geschwindigkeit erteilt haben würden, daß er sich vom Stahlplättchen sehr rasch wieder gelöst haben würde. Außerdem

wurde der Fallhebel durch die Stellschrauben in seinen Spitzenlagern so festgeklemmt, daß er mit mäßiger Reibung sich bewegte, wodurch eine allzu leichte Beweglichkeit aufgehoben war.

Da der Pendelunterbrecher nur 4 Kontakte hatte, von denen zwei für den Kondensatorzweig, einer für das Einschalten und einer für das Ausschalten des eingeprägten Stromes nötig waren, so wurde zunächst versucht, einem Kontakte das Ausschalten des eingeprägten Stromes und die Herstellung der Kurzschlußverbindung zu übertragen. Aber infolge von elastischen Durchbiegungen stellte sich der Kurzschluß einen Augenblick eher her, als der Hauptstrom ausgeschaltet war, und es erfolgte durch den Kurzschlußzweig ein starker Stromstoß, welcher seinerseits nach dem Unterbrechen der Leitung für den eingeprägten Strom sich durch den Wismutdraht ausglich, wodurch in diesem störende Ladungen auftraten. Man mußte also die Unterbrechung des Stromes und die Herstellung des Kurzschlusses zwei getrennten Kontakten übertragen, und darum machte es sich nötig, noch einen weiteren, fünften Kontakt am Pendelunterbrecher anzubringen. In der Werkstatt des Institutes wurden nun zwei Pendelkontakte hergestellt, welche den bereits vorhandenen bis auf einige, durch den Raummangel am Apparat bedingte Konstruktionsabänderungen glichen. Sie wurden noch neben den alten 4 Kontakten eingefügt.

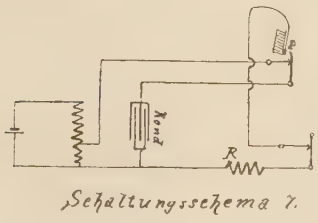


Fig. 18.

Ehe man an die eigentlichen Versuche gehen konnte, mußte geprüft werden, ob der Schließungskontakt nicht abklirrte. Die Untersuchungsmethode ist aus Schaltungsschema 7 (Fig. 18) zu erkennen. In diesem stellt P die am fallenden Pendel befindliche Kontaktscheibe dar. Der aufgeladene Kondensator klingt durch den Widerstand R ab. Wenn der Kontakt bei P sich löst, wird die Abklingung unterbrochen und die aufgenommene Kurve verläuft horizontal. Es seien hier 2 Abklingungskurven angegeben:

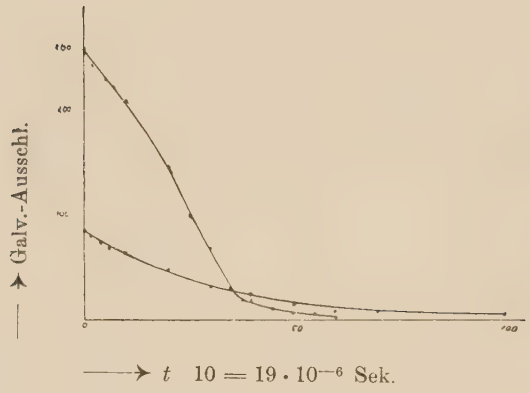


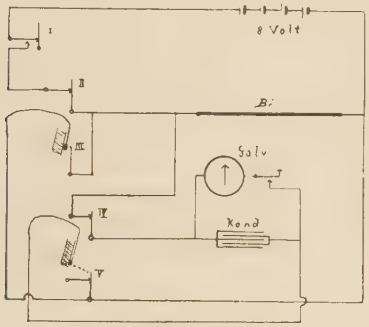
Fig. 19.

Tabelle 37.

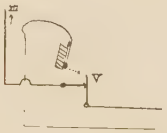
Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometer-ausschläge	Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometer-ausschläge
0	83	0	260
2	80	2	243
4	75	5	230
7	68	7	222
10	62	10	210
20	46	15	198
30	32	20	142
40	22	25	100
50	17	30	68
70	9	35	28
100	4	40	18
—	—	45	13
—	—	50	8
—	—	55	6
—	—	60	4

Man sieht, daß am Schließungskontakt die Leitung in der in Betracht gezogenen Zeit nicht unterbrochen gewesen ist.

Für die Untersuchungen über den Einfluß eines Kurzschlusses ergab sich nun das Schaltungsschema 8. Die Pendelkontakte I bis V wurden in der Reihenfolge, in welcher sie von links aufeinanderfolgen, ausgelöst. I schließt den eingeprägten Strom, II unterbricht ihn und III stellt darauf den Kurzschluß her. Dieser löst sich von selbst durch das stets zur selben Zeit nach dem Kontaktschluß stattfindende Abschnellen des Fallhebels. IV und V bedienen wie sonst den Kondensatorzweig.



Schaltungsschema 8.



Schaltungsschema 8a.

Fig. 20.

Bei der Aufnahme einer Abklingungskurve blieben wie früher I, IV und V an ihrem Platz, während II und III gemeinsam um gleiche Beträge verschoben wurden.

Es war, wie man leicht ersieht, möglich, die Spannungsdifferenz an den Enden des Wismutdrahtes sowohl während des Kurzschlusses als auch nach dessen Lösung festzustellen. Im ersteren Falle mußte sie sich als sehr gering erweisen; ganz zu Null wurde sie nicht, da die Übergangswiderstände an den Pendelkontakten sich geltend machten. Man hatte durch diese Beobachtungen während der Kurzschlußzeit eine Kontrolle dafür, ob der Kurzschluß wirklich eintrat. Wurde nun aber durch Verstellen der Kontakte II und III bewirkt, daß die Messung erst nach der Lösung des Kurzschlusses erfolgte, so mußte sich zeigen, ob auch nach dem Kurzschluß die Enden

des Wismutdrahtes eine Spannungsdifferenz aufwiesen. Und wenn dies der Fall war, so war diese Spannungsdifferenz zu vergleichen mit der, welche man erhielt, wenn kein Kurzschluß vorausgegangen war.

Es seien einige Beobachtungsreihen angegeben. A wurde an einem gewöhnlichen Hartmann und Braunschen Draht gewonnen, B an einem durch Erwärmen umgewandelten Hartmann und Braunschen Draht, C an einem Wismutfaden in Glaskapillare und endlich D an einem in Glas ausgezogenen Wismutfaden.

Tabelle 38.

Verschiebung d. Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge							
	A		B		C		D	
	mit Kurzschluß	ohne Kurzschluß	mit Kurzschluß	ohne Kurzschluß	mit Kurzschluß	ohne Kurzschluß	mit Kurzschluß	ohne Kurzschluß
0	Stromausschalten							
20	0	73	10	208	—	—	14	54
30	0	61	10	196	18	82	8	52
40	0	51	10	185	15	82	8	51
60	0	48	— 3	170	10	82	3	49
80	0	41	— 10	160	11	79	1	49
100	35	35	0	150	10	78	8	48
120	30	30	142	142	62	76	52	45
140	27	26	134	133	70	71	45	43
190	20	20	118	118	68	68	42	42
240			107	105	67	65	39	40
290			95	94	62	62	38	39
340			88	87	60	60	37	38
440			72	72	53	53	33	35
640			51	52	50	50	29	30
840			41	40	48	42	23	23
1040			32	32	40	39	21	22

Gegenseitige Verschiebung d. Kontakte II und III: 20 Trommelt.
Elektromotorische Kraft des eingeprägten Stromes: 8 Volt.

Innerhalb der Beobachtungsgenauigkeit ist nicht der geringste Einfluß des zwischen Stromausschalten und Messung liegenden Kurzschlusses auf den nachfolgenden Teil der Abklingungskurve zu bemerken; die nach dem Kurzschluß erhaltene Abklingungskurve ist identisch mit der ohne Kurzschluß gewonnenen.

Von großem Interesse mußte nun die Feststellung der Geschwindigkeit sein, mit welcher die Spannungsdifferenz an den Drahtenden nach dem Kurzschluß auf die Werte ansteigt, welche sie ohne Kurzschluß hat. Eine direkte Messung dieser Geschwindigkeit war natürlich nicht möglich, da die Trägheit der ganzen Meßanordnung, bedingt vor allem durch die Aufladezeit des Kondensators, es unmöglich macht, Vorgänge, die in derartig kurzen Zeiten (10^{-5} Sek.) sich abspielen, eingehend zu verfolgen. Es konnten hier nur Vergleiche unternommen werden. Dies geschah folgendermaßen:

Man griff eine bestimmte Stelle der Abklingungskurve heraus, ließ den Kurzschluß bis zu dem dadurch festgelegten Zeitpunkte andauern und nahm nun den Spannungsanstieg im Kondensator nach der Lösung des Kurzschlusses auf. Diesen Anstieg mußte man vergleichen mit demjenigen, welchen man erhielt, wenn man in die Versuchsanordnung an Stelle des Wismutdrahtes einen Draht von demselben Widerstand einschaltete, an dessen Enden aber nach dem Öffnen des Kurzschlusses die Spannung so rasch ihren Endwert annahm, daß dieser Anstieg für die vorliegenden Beobachtungen als augenblicklich angesehen werden konnte. Der Endwert der Spannungsdifferenz am Versuchsdrahte mußte denselben Betrag haben wie die zurückbleibende elektromotorische Kraft an der in Betracht gezogenen Stelle der Abklingungskurve.

Der Vergleichsdraht wurde dargestelllt durch einen Manganindraht. Die elektromotorische Kraft an seinen Enden lieferte ein Akkumulator, in dessen Stromkreis der Manganindraht und ein selbstinduktionsloser Widerstand hintereinandergeschaltet waren. Der letztere wurde so gewählt, daß die Spannungsdifferenz zwischen den Enden des Vergleichsdrahtes

die erforderliche Größe hatte. Da der gerade ausgespannte Manganindraht äußerst geringe Selbstinduktion hatte und durch Kurzschließen dieses Drahtes die Stromstärke im Stromkreis um nur 1 % geändert wurde, so war Verzögerung des Spannungsanstieges durch Selbstinduktion oder Kapazität ausgeschlossen und die Spannung mußte im Vergleich zu den bei unseren Messungen in Betracht kommenden Zeiten im Manganindraht augenblicklich ihren Endwert annehmen.

Die Versuche wurden nun so vorgenommen, daß das Schaltungsschema 8 bis auf eine kleine Änderung beibehalten wurde. Diese bestand darin, daß man dem Kontakt V, wie es in Schaltungsschema 8a gezeigt ist, den Kurzschluß aufheben und gleichzeitig den Meßkondensator anlegen ließ. Durch Verstellen des Kontaktes V, während alle anderen an ihrem Platze blieben, konnten verschiedene Punkte des Spannungsanstieges im Kondensator geprüft werden. Es wurden die Beobachtungen auch an verschiedenen Stellen der Abklingungskurve vorgenommen, damit man einen etwa in dieser Hinsicht bestehenden Unterschied feststellen konnte. Es seien einige Beobachtungsergebnisse angegeben:

Tabelle 39.

Hartmann und Braunscher Draht (∅ = 0,3 mm).

Verschiebung des Kontaktes V in Trommelteilen	Galvanometerausschläge für den Spannungsanstieg im Kondensator bei			
	Manganin	Wismut	Manganin	Wismut
0	0	— 4	0	0
3	0	— 3	0	0
5	15	+ 20	22	18
6	45	42	30	30
7	54	42	30	30
8	60	60	32	31
9	65	62	32	33
10	60	60	33	33
	$30 \cdot 19 \cdot 10^{-7}$ Sek.		$80 \cdot 19 \cdot 10^{-7}$ Sek.	
	nach dem Stromausschalten.			

Tabelle 40.

Durch Erwärmen umgewandelter H. u. B.-Draht ($\varnothing = 0{,}3$ mm).

Verschiebung des Kontaktes V in Trommelteilen	Galvanometerausschläge für den Spannungsanstieg im Kondensator bei			
	Manganin	Wismut	Manganin	Wismut
0	0	0	7	—
3	5	10	10	0
5	13	10	8	18
6	70	40	75	80
7	100	110	100	103
8	168	170	135	140
9	168	185	132	149
10	185	176	130	150
	$30 \cdot 19 \cdot 10^{-7}$ Sek.		$80 \cdot 19 \cdot 10^{-7}$ Sek.	
	nach dem Stromausschalten			

Tabelle 41.

Wismut in Glaskapillare.

Verschiebung des Kontaktes V in Trommelteilen	Galvanometerausschläge für den Spannungsanstieg im Kondensator bei			
	Mang.	Wismut	Mang.	Wismut
0	0	10	8	—
3	2	10	3	6
5	30	18	0	10
6	120	100	30	48
7	111	115	72	63
8	98	115	92	98
9	98	108	98	99
10	98	98	96	95
	$30 \cdot 19 \cdot 10^{-7}$ Sek.		$80 \cdot 19 \cdot 10^{-7}$ Sek.	
	nach dem Stromausschalten			

Innerhalb der Beobachtungsgenauigkeit verläuft der Spannungsanstieg im Meßkondensator bei Messungen am Wismutdraht ebensoschnell wie bei Messungen am Manganindraht.

Demnach darf man wohl annehmen, daß am Wismutdraht die elektromotorische Kraft nicht auf bloße Ansammlung eines beschränkten Quantums wahrer Elektrizitätsmengen zurückzuführen ist, welche durch irgend einen Vorgang erzeugt werden, sondern daß es sich eben um eine Spannungsdifferenz handelt, wie wir sie z. B. an einer thermoelektrischen Kette beobachten, wo die thermoelektrische Kraft immer neue wahre Elektrizitätsmengen nachliefert.

9. Der Einfluß des Magnetfeldes.

Die Untersuchungen über den Einfluß eines Magnetfeldes auf die am Wismutdraht zurückbleibende elektromotorische Kraft mußten um so mehr Interesse für sich beanspruchen, als die früheren Untersuchungen, sofern bei ihnen die Kraftlinien des Feldes senkrecht zu der Stromrichtung im Draht verliefen, ein fast entgegengesetztes Verhalten des Wismuts im Felde und außerhalb desselben festgestellt hatten. Weiterhin hatten Versuche Lenards aber gezeigt, daß ein magnetisches Feld, bei welchem die Kraftlinien parallel zur Stromrichtung waren, das Vorzeichen der Differenz zwischen Wechselstromwiderstand und Gleichstromwiderstand nicht umkehrte, sondern den außerhalb des Feldes bestehenden Effekt verstärkte. Sonach durfte man hoffen, durch die Untersuchungen im Magnetfelde einige neue interessante Punkte über die Stromleitung im Wismut aufzufinden.

Es war bereits auch eine Zweiteilung für die vorzunehmenden Versuche vorgeschrieben, nämlich eine Spaltung in solche mit den Magnetfeld-Kraftlinien parallel zur Stromrichtung und in andere, bei welchen die Kraftlinien senkrecht zur Stromrichtung verliefen. Die Untersuchung der zurückbleibenden elektromotorischen Kraft geschah natürlich mit derselben Anordnung wie bei den früheren Versuchen (Schaltungsschema 6, Fig. 9), nur mußte das Wismut in das Feld eines Magneten gebracht werden.

Der das Feld liefernde Magnet bestand aus einem Teile des zerlegbaren Elektromagneten des Institutes. Der Eisenkern

war aus 5 Dynamogußstahlblöcken von quadratischem Querschnitt aufgebaut, wie es die Fig. 21 zeigt. Auf die senkrechten Teile des Eisengerüstes waren die 4 Magnetisierungsspulen gleichmäßig verteilt, die von der Starkstromleitung des Institutes (110 Volt) gespeist wurden. Der Luftspalt befand sich zwischen den beiden oberen horizontalliegenden Blöcken, welche wegen der bedeutenden Zugkraft, die die Polflächen aufeinander ausübten, durch zwischen sie geschobene Holzstäbchen in der gewünschten Entfernung gehalten wurden. Die Weite des Luftspaltes betrug, wenn die Kraftlinien senkrecht zur Stromrichtung verliefen, 6 mm. Die Versuche, bei denen die Kraftlinien parallel zur Stromrichtung waren, verlangten natürlich einen weiteren Spalt, er wurde 12 mm gewählt. Um aber auch hier ohne allzugroßen Stromaufwand starke Felder zu erreichen, wurde die Isthmusmethode angewandt. Polschuhe von 45° Neigung drängten die Kraftlinien so zusammen, daß bei 5×5 cm Polfläche im 12 mm weiten Luftspalt eine Feldstärke von 10000 Gauß von einem Strom von 7 Ampere hervorgebracht wurde.

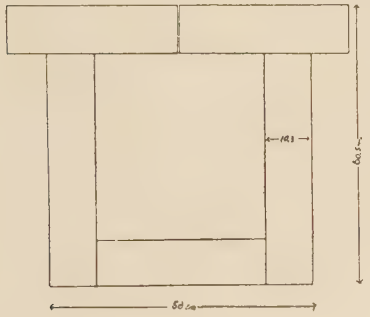


Fig. 21.

Um die beim Ausschalten an diesem Magneten auftretenden sehr starken Extraströme unschädlich zu machen, waren zum Ausschalter parallel 4 nebeneinander geordnete Glühlampen geschaltet, welche dem beim Unterbrechen des starken Stromes entstehenden Extrastrome noch einen Weg zum Ausgleich übrig ließen. Vollends wurde die Strombahn erst unterbrochen, wenn man die Glühlampen aus ihrer Fassung schraubte.

Die Versuche wurden vorgenommen bei den Feldstärken 0, 4000, 6000, 8000 und 10000 Gauß. Um diese Feldstärken bequem immer wieder herstellen zu können, wurden die Stromstärken, welche im Luftspalt die gewünschten Feldstärken hervor-

riefen, mittelst eines im Erregerstromkreis befindlichen Amperemeters bestimmt. Dabei wurde die Stärke des magnetischen Feldes durch die Widerstandsänderung einer im Feld befindlichen Wismutspirale gemessen. Durch Einstellen des Stromes auf die so festgelegten Stromstärken ließen sich die verschiedenen Feldstärken in der für die vorliegenden Versuche erforderlichen Genauigkeit leicht hervorrufen.

a) Kraftlinien parallel der Stromrichtung.

Wie schon oben erwähnt, war der Luftspalt bei den Untersuchungen über die Einwirkung eines magnetischen Feldes, dessen Kraftlinien in der Richtung des Wismutdrahtes verliefen, 12 mm weit. Es konnten also nur 10 mm lange Drahtstückchen in Richtung der Kraftlinien liegen. Hätte man nun den Draht zickzackartig biegen wollen, so wäre das nur bei starkem Erwärmen des Drahtes möglich gewesen, wodurch sich Strukturänderungen eingestellt hätten, die ihrerseits wiederum den Effekt beeinflußt haben würden. Es wurde darum folgendes Verfahren angewandt:

Fig. 22.

1 cm lange Stückchen von Wismutdraht wurden dicht nebeneinander auf ein Glimmerblättchen aufgekittet und an ihren Enden so zusammengelötet, wie Fig. 22 es zeigt. Die äußersten Enden wurden an Kupferdrähte angelötet. Das Löten geschah mit Woods Metall, wobei der Kolben nur so heiß gemacht wurde, daß das Lötmetall gerade schmolz. So blieb die Struktur des Drahtes so weit als möglich erhalten. Vor allem hatte man bei dieser Anordnung des Wismutdrahtes noch den Vorteil, daß hier alle im Wismut verlaufenden Stromfäden, so weit man es erreichen konnte, parallel liefen, also in Richtung der Kraftlinien eingestellt werden konnten. Es war dies erforderlich, da, wie spätere Versuche zeigen werden, die Einwirkung auf die senkrecht zu den Kraftlinien verlaufenden Drahtteile so groß ist, daß sie eine genauere Beurteilung der eigentlich zu beobachtenden Wirkung vereitelt haben würde.

Hartmann und Braunscher Draht (Durchmesser 0,3 mm) zeigte nun die folgenden Abklingungskurven. Es sei noch erwähnt, daß die durch das Feld hervorgerufenen Widerstandsänderungen in derselben Weise kompensiert wurden wie bei den Temperaturversuchen die dort auftretenden Widerstandsverschiedenheiten.

Tabelle 42.

Verschiebung des Kontaktes I	Galvanometerausschläge bei den Feldstärken				
	0 Gauß	4000 Gauß	6000 Gauß	8000 Gauß	10000 Gauß
0	Stromausschalten				
20	129	160	178	192	203
30	110	134	150	170	182
40	102	120	139	152	162
50	95	110	128	142	149
60	84	100	118	133	138
80	78	90	103	116	120
100	68	82	95	100	108
130	60	72	83	92	92
180	51	59	67	72	75
280	39	47	50	56	53
480	28	28	35	36	33
680	22	26	30	30	26
880	18	22	27	28	18
Widerstand d. Bi-Drahtes	2,74 Ohm	2,92 Ohm	3,11 Ohm	3,29 Ohm	3,44 Ohm

Stärke des eingeprägten Stromes: $\frac{12 \text{ Volt}}{3{,}63 \text{ Ohm.}}$

Der Einfluß des Magnetfeldes geht dahin, daß er, ohne die Abklingungsgeschwindigkeit zu ändern,[1]) die Stärke der zurückbleibenden elektromotorischen Kraft erhöht, und zwar

[1]) Die Abklingungskurve bei 10000 Gauß fällt rascher ab als die anderen, doch darf man dies als eine Störung ansehen, die dadurch hervorgerufen wurde, daß nicht alle Teile des Wismutdrahtes den Kraftlinien parallel gelegen haben, so daß sich hier der später zu betrachtende Effekt im transversalen Magnetfeld geltend machte.

erfolgt diese Vergrößerung der Nachwirkung in erster Annäherung proportional der Stärke des Magnetfeldes.

Es ergab sich nun sofort die Aufgabe, zu untersuchen, ob diese Erhöhung der zurückbleibenden elektromotorischen Kraft eine bloße Vergrößerung des bisher beobachteten Effektes oder eine für sich bestehende Erscheinung ist. Zunächst mußte etwas Aufschluß in dieser Hinsicht die Abhängigkeit von der Stärke des eingeprägten Stromes geben. Es wurde darum das im starken Magnetfelde (10000 Gauß) befindliche Wismut mit verschieden starkem Strome beschickt. Die Änderung der Stromstärke wurde durch Vermehrung oder Verminderung der Akkumulatorenanzahl bewirkt. Man gewann folgende Ergebnisse:

Tabelle 43.

Verschiebung d. Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge, wenn die elektromotorische Kraft für den eingeprägten Strom betrug						
	12 Volt	6 Volt	4 Volt	2 Volt	12 Volt	4 Volt	2 Volt
0	Stromausschalten						
20	215	102	63	28	123	41	20
30	190	88	58	25	114	38	18
40	173	82	52	22	108	36	16
50	160	73	48	21	100	33	16
60	148	68	43	19	94	31	15
80	132	58	38	18	86	28	13
100	118	52	33	16	80	25	12
130	98	44	29	12	71	22	10
180	83	37	22	11	60	19	9
230	70	30	18	9	53	18	8
280	61	22	15	7	48	12	6
380	48	14	10	4	42	11	—
580	32	8	6	—	33	9	—
780	24	4	—	—	30	8	—
980	21	—	—	—	26	—	—
Magnetfeld	10000 Gauß				0 Gauß.		

Zum Vergleich sind noch die Abklingungskurven im Felde 0 hinzugefügt.

Bei allen im Magnetfeld gewonnenen Kurven ist die Abklingungsgeschwindigkeit dieselbe. Die durch den Einfluß des Magnetfeldes verstärkte am Wismut zurückbleibende elektromotorische Kraft wächst proportional mit der Stromstärke. Dies würde dafür sprechen, daß die Vergrößerung der Nachwirkung kein selbständiger Effekt ist. Wenn diese Annahme richtig war, durfte ein Draht, welcher außerhalb des Feldes nur einen kleinen Effekt zeigte, auch im Magnetfeld, dessen Kraftlinien parallel der Stromrichtung waren, keine große Nachwirkung aufweisen. Versuche mit dem aus Pulver gepreßten Draht ergaben wirklich im Magnetfeld keinen starken Effekt und erweisen so die obige Annahme als berechtigt.

Tabelle 44.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei der Feldstärke	
	0 Gauß	10000 Gauß
0	Stromausschalten	
20	16	18
30	16	18
40	17	16
50	17	15
60	17	13
80	17	13
100	17	12
130	16	12
180	16	10
230	15	8
280	13	3
380	11	0
580	9	0
780	7	−8

Elektromotorische Kraft für den eingeprägten Strom 8 Volt.

Die rasche Abklingung der Kurve bei 10000 Gauß rührt von Störungen durch den Effekt im transversalen Feld her.

deren Einfluß sich nach den späteren Versuchen leicht abschätzen läßt. Ziehen wir die Störung ab, so wird die Kurve ungefähr mit 35 beginnen.

Eine weitere Bestätigung dafür, daß die im Magnetfeld gefundene Erscheinung nur eine Verstärkung des außerhalb des Feldes bestehenden Effektes ist, lieferte ein Draht, welcher durch Erwärmen ausgeprägte kristallische Struktur erhalten hatte und infolgedessen auch eine starke Nachwirkung aufwies. Im Felde (mit Kraftlinien parallel der Drahtrichtung) verstärkte sich die zurückbleibende elektromotorische Kraft ungefähr im gleichen Verhältnis wie bei dem früher untersuchten Hartmann und Braunschen Draht.

Tabelle 45.

Verschiebung d. Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Feldstärken				
	$0 \cdot 10^3$ Gauß	$4 \cdot 10^3$ Gauß	$6 \cdot 10^3$ Gauß	$8 \cdot 10^3$ Gauß	$10 \cdot 10^3$ Gauß
0	Stromausschalten				
20	138	178	210	230	245
30	132	180	210	230	245
40	123	168	190	219	228
60	114	168	172	199	212
80	109	142	163	187	202
100	102	142	162	175	190
130	96	128	143	162	175
180	92	107	132	143	160
280	72	93	108	122	138
380	61	78	100	105	118
580	49	62	78	85	98
780	42	58	62	72	80
980	30	43	54	58	65
1480	22	28	32	36	40
Widerstand des Wismutdrahtes	1,47 Ohm	1,55 Ohm	1,66 Ohm	1,76 Ohm	1,85 Ohm

Stärke des eingeprägten Stromes $\frac{8 \text{ Volt}}{2{,}14 \text{ Ohm}}$.

Es darf also nach den Ergebnissen der ausgeführten Versuche die Behauptung aufgestellt werden, daß im Felde, dessen Kraftlinien der Stromrichtung parallel laufen, die am Wismutdraht zurückbleibende elektromotorische Kraft sich vergrößert, und daß diese Vergrößerung nur eine Verstärkung des außerhalb des Feldes bestehenden Effektes ist.

b) Kraftlinien senkrecht zur Drahtrichtung.

Nach bekannten Gesetzen mußte der senkrecht zu den Kraftlinien des magnetischen Feldes liegende Wismutdraht eine ponderomotorische Kraftwirkung erfahren, sobald ein Strom ihn durchfloß. Es war deshalb nötig, den Draht, sofern er nicht schon sicher geschützt war, wie z. B. durch die Glashülle bei dem in Kapillaren eingesaugten Metall, gegen Zerreißen durch Aufkitten auf eine feste Unterlage zu schützen. Der Draht wurde darum zwischen 2 Glimmerblättchen mit Wachs festgeklebt.

Durch die oben erwähnte Kraftwirkung wurde nun der Draht mitsamt seiner Unterlage beim Fließen des Stromes in Bewegung versetzt, wenn man nicht Vorkehrungen traf, daß alle Kraftkomponenten sich aufhoben. Dies erreichte man dadurch, daß man die den Strom zuleitenden Drähte dicht nebeneinander auf die Unterlage zuführte. Dann bildete die Strombahn innerhalb des Magnetfeldes eine starre fast geschlossene Figur, an welcher alle Kraftkomponenten sich gegenseitig vernichteten. Diese Vorsichtsmaßregel war nötig, denn wenn der Draht in Bewegung geriet, konnten leicht störende Induktionsströme entstehen.

Die Versuche über den Einfluß des Magnetfeldes mit Kraftlinien senkrecht zur Stromrichtung ergaben an allen Proben qualitativ das Gleiche. Es seien einige Abklingungskurven als Beispiele angegeben:

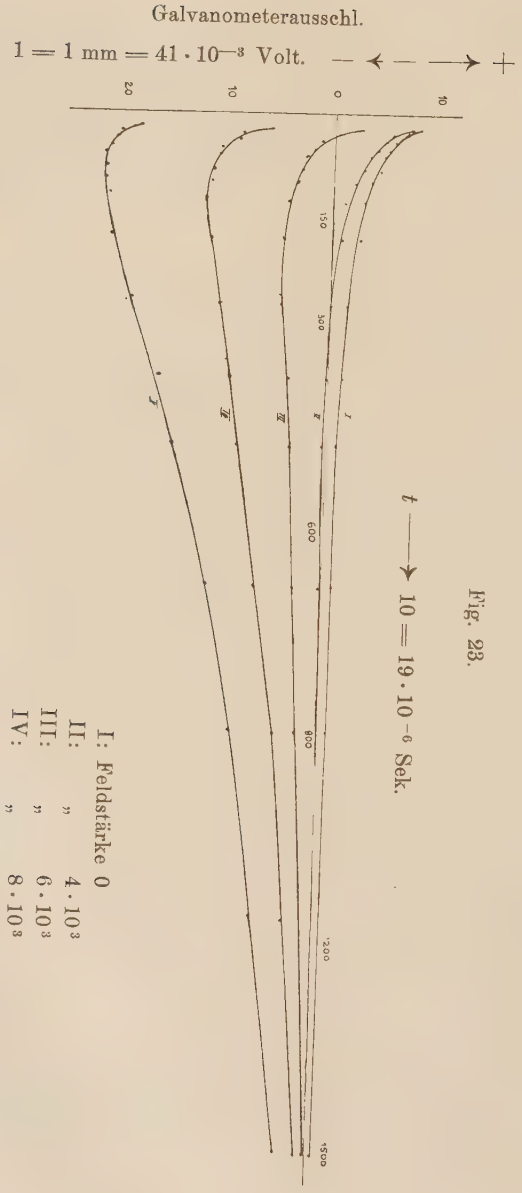

Galvanometerausschl.
1 = 1 mm = 41 · 10⁻³ Volt.
— ← — → +
20
10
0
10
150
300
600
900
1200
1500
I
II
III
IV
V
t ⟶ 10 = 19 · 10⁻⁶ Sek.
I: Feldstärke 0
II: „ 4 · 10³
III: „ 6 · 10³
IV: „ 8 · 10³
V: „ 10 · 10³

Fig. 23.

Tabelle 46.
Spirale von Hartmann und Braun.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Feldstärken				
	0 Gauß	4000 Gauß	6000 Gauß	8000 Gauß	10000 Gauß
0	Stromausschalten				
20	52	35	— 40	— 143	— 290
30	43	20	52	150	291
40	38	10	60	153	298
50	30	8	63	159	288
60	28	3	67	158	280
80	22	0	68	152	270
100	22	— 1	70	149	269
130	13	— 7	68	142	255
180	12	— 7	59	130	230
280	12	— 8	48	102	181
380	10	— 8	39	85	150
480	8	— 6	38	72	120
680	7	— 5	22	47	85
880	5	0	20	35	60
1080	4	0	15	21	43
1580	—	—	3	10	20
Widerstand	25,0 Ohm	28,5 Ohm	30,8 Ohm	33,7 Ohm	36,1 Ohm

Stärke des eingeprägten Stromes: $\frac{12 \text{ Volt}}{36{,}1 \text{ Ohm.}}$

Tabelle 47. (Hierzu Fig. 23).
Draht von Hartmann und Braun (∅ 0,3 mm).

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Feldstärken				
	0 Gauß	4000 Gauß	6000 Gauß	8000 Gauß	10000 Gauß
0	Stromausschalten				
20	81	78	+ 26	— 60	— 185
30	68	58	+ 2	88	204
40	59	50	— 13	90	208
50	53	42	— 20	110	215

(Fortsetzung der Tabelle auf nächster Seite).

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Feldstärken 0 Gauß	4000 Gauß	6000 Gauß	8000 Gauß	10000 Gauß
60	50	36	— 28	110	220
80	43	28	32	114	218
100	38	20	35	118	219
130	32	13	42	122	217
180	28	8	42	118	209
280	18	0	42	105	187
380	15	— 2	38	95	160
480	12	— 3	35	83	146
680	10	— 2	25	63	110
880	8	0	22	41	82
1080	8	0	13	34	60
1580	7	0	4	12	30
Widerstand d. Bi-Drahtes	2,5 Ohm	2,8 Ohm	3,1 Ohm	3,4 Ohm	3,7 Ohm

Stärke des eingeprägten Stromes: $\frac{12 \text{ Volt}}{3{,}7 \text{ Ohm.}}$

Tabelle 48.

Wismut in Glaskapillaren.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Feldstärken 0 Gauß	4000 Gauß	6000 Gauß	8000 Gauß	10000 Gauß
0	Stromausschalten				
30	30	28	18	0	— 20
50	31	28	17	— 1	— 22
80	30	25	13	— 5	— 23
130	27	23	11	— 9	26
180	23	20	8	— 10	29
280	20	18	8	— 10	28
380	19	15	4	— 15	30
480	18	12	0	— 19	33
680	13	10	0	— 15	27
880	11	9	0	— 10	29
1080	11	9	0	— 10	12
Widerstand d. Bi-Drathes		0,30 Ohm	0,32 Ohm	0,34 Ohm	0,37 Ohm

Tabelle 49.

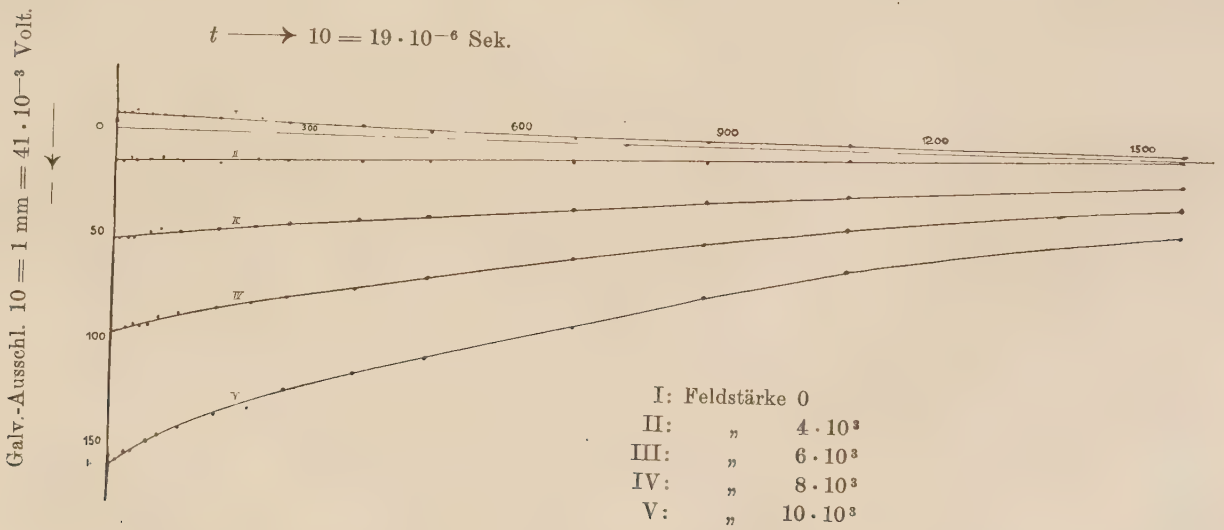
In Glas ausgezogenes Wismut.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Feldstärken				
	0 Gauß	4000 Gauß	6000 Gauß	8000 Gauß	10000 Gauß
0	Stromausschalten				
20	62	60	62	59	52
40	60	58	58	57	48
60	58	54	57	52	47
80	54	52	55	52	42
100	52	51	53	52	41
130	40	49	48	50	40
180	48	48	46	48	38
280	43	40	43	47	38
380	50	38	41	43	38
480	37	35	38	42	38
680	30	28	30	40	25
880	28	21	23	30	18
1080	23	19	21	22	20
Widerstand d. Bi-Drahtes	1,56 Ohm	1,72 Ohm	1,83 Ohm	1,98 Ohm	2,11 Ohm

Stärke des eingeprägten Stromes: $\frac{8 \text{ Volt}}{3{,}6 \text{ Ohm}}$.

Es hatte ganz den Anschein, als ob über den außerhalb des Feldes bestehenden Effekt sich ein neuer von entgegengesetztem Vorzeichen übergelagert hätte, der mit der Stärke des Magnetfeldes zunimmt und der sich an verschiedenen Wismutdrähten verschieden stark äußert. War diese neue Erscheinung von dem Effekt außerhalb des Feldes unabhängig, so konnte sie auch auftreten, wenn der letztere nicht zu beobachten war. Darum wurde der aus Pulver gepreßte Draht untersucht:

Fig. 24.



I: Feldstärke 0
II: „ $4 \cdot 10^3$
III: „ $6 \cdot 10^3$
IV: „ $8 \cdot 10^3$
V: „ $10 \cdot 10^3$

Tabelle 50. (Hierzu Fig. 24).

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei den Feldstärken				
	$0 \cdot 10^3$ Gauß	$4 \cdot 10^3$ Gauß	$6 \cdot 10^3$ Gauß	$8 \cdot 10^3$ Gauß	$10 \cdot 10^3$ Gauß
0	Stromausschalten				
30	+8	— 16	— 52	— 98	— 160
40	8	16	52	94	158
50	8	13	52	95	153
60	5	14	52	92	153
80	8	13	49	93	149
100	8	13	48	89	145
130	8	14	48	87	142
180	6	15	47	83	135
230	7	12	45	81	132
280	5	12	43	78	122
380	5	12	40	73	113
480	3	11	38	67	105
680	2	10	32	55	88
880	2	8	27	47	72
1080	2	5	22	38	58
1580	2	0	14	23	38
Widerstand d. Bi-Drahtes	1,5 Ohm	1,7 Ohm	1,8 Ohm	1,9 Ohm	2,0 Ohm

Stärke des eingeprägten Stromes: $\frac{12 \text{ Volt}}{2{,}2 \text{ Ohm}}$.

Es zeigt sich an dem aus Pulver gepreßten Drahte der Effekt im Magnetfelde, obgleich außerhalb des Feldes keine Nachwirkung besteht, wodurch Unabhängigkeit beider Effekte (im Feld und außerhalb desselben) voneinander erwiesen ist.

Weitere Bestätigungen für dies Ergebnis konnten noch erbracht werden. Durch Erwärmen des gepreßten Wismutdrahtes läßt sich dessen Nachwirkung außerhalb des Feldes erhöhen (S. 53), dabei verstärkt sich aber der Effekt im transversalen Magnetfeld nicht:

Tabelle 51.

Hartmann und Braunsche Drähte (∅ 0,3 mm).

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge							
	Probe I				Probe II			
	vor Erhitzung auf 230°. Magnetfeld:		nach Erhitzung auf 230°. Magnetfeld:		vor Erhitzung auf 225°. Magnetfeld:		nach Erhitzung auf 225°. Magnetfeld:	
	0	8000	0	8000	0	8000	0	8000
0	Stromausschalten							
20	+ 67	− 51	+ 142	+ 70	+ 13	− 190	+ 80	− 45
30	57	58	138	68	9	191	70	50
40	50	60	132	70	8	191	68	53
50	46	62	128	68	5	189	60	56
70	38	65	120	68	—	182	53	58
100	30	68	110	60	—	171	48	58
150	20	68	98	57	—	159	38	58
200	17	62	88	51	—	145	31	53
250	10	60	87	49	—	132	28	52
300	8	58	83	47	—	119	23	50
350	6	53	75	43	—	110	20	49

Tabelle 52.

Selbstgefertigter Wismutdraht.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge									
	vor dem Erhitzen auf 250°. Feldstärken:					nach dem Erhitzen auf 250°. Feldstärken:				
	$0 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	$0 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$
0	Stromausschalten									
30	+ 53	− 32	− 20	− 110	− 221	+ 69	+ 54	+ 8	− 63	− 160
40	48	22	− 32	119	230	61	47	0	75	170
50	40	18	− 40	124	235	53	41	− 8	82	178
60	36	12	− 47	130	238	52	38	− 13	91	182
80	32	8	− 49	132	240	48	32	− 17	91	182
100	28	4	− 52	132	240	41	25	− 23	98	186

(Fortsetzung der Tabelle auf nächster Seite).

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge vor dem Erhitzen auf 250°. Feldstärken:					nach dem Erhitzen auf 250°. Feldstärken:				
	$0 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	$0 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$
130	22	0	−56	137	239	38	21	−27	102	190
180	19	−8	−58	133	230	36	18	−29	102	190
230	15	−9	−57	130	219	31	12	−32	98	180
280	13	−11	−57	127	210	32	10	−31	95	172
380	11	−12	−57	120	200	25	8	−31	90	168
480	8	−12	−52	112	183	20	3	−35	87	157
680	7	−13	−48	98	169	18	0	−32	80	143
880	6	−12	−40	82	137	13	0	−24	63	112
1080	4	−9	−32	68	112	12	0	−26	60	103
Widerst. des Bi-Drahtes	1,71	1,99	2,14	2,30	2,46	1,78	1,74	1,93	2,05	2,21

Stärke des eingepr. Stromes: $\frac{12 \text{ Volt}}{2{,}7 \text{ Ohm}}$ $\frac{12 \text{ Volt}}{2{,}5 \text{ Ohm}}$.

Daß der Effekt im transversalen Magnetfeld auch unabhängig ist von der Verstärkung der zurückbleibenden elektromotorischen Kraft, welche ein Feld hervorbringt, bei dem die Kraftlinien der Stromrichtung parallel laufen, folgte bereits aus allen angeführten Versuchen. Es war aber vielleicht wünschenswert, daß diese Unabhängigkeit an ein und derselben Wismutprobe gezeigt wurde, da man bis jetzt auf sie nur aus Beobachtungen an verschiedenen Stücken schließen konnte. Es wurde darum ein aus Pulver gepreßtes Drahtstück untersucht, wobei einmal die Kraftlinien parallel, das andere Mal aber senkrecht zur Drahtachse verliefen. Im ersteren Falle erwies sich nun die zurückbleibende elektromotorische Kraft als sehr gering, während sie im zweiten Fall den für den Effekt im transversalen Feld gewöhnlichen Betrag hatte.

Tabelle 53.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge wenn die Kraftlinien verlaufen zur Drahtachse parallel	senkrecht
0	Stromausschalten	
20	+18	—110
30	18	—105
40	16	—103
50	15	—105
60	13	—105
80	13	—103
100	12	—98
130	12	—97
180	10	—93
230	8	—90
280	3	—88
380	0	—83
580	0	—68
780	—8	—51
980	—5	—42
Widerstand des Bi-Drahtes	0,92 Ohm	1,11 Ohm

Feldstärke 10000 Gauß. (Widerstand i. Feld 0 betrug 0,83 Ohm).

Wollte man etwas Näheres über den Effekt im transversalen Felde erfahren, so mußte man für die Untersuchung eine Wismutprobe wählen, die außerhalb des Feldes keine Nachwirkung zeigte, damit die Störung durch diese ausgeschaltet blieb. Zunächst ließ sich die Abhängigkeit von der Stärke des Magnetfeldes leicht feststellen. Sie ist zu ersehen aus Tabelle 50. Während der Betrag der zurückbleibenden elektromotorischen Kraft mit dem Felde wächst, bleibt die Abklingungsgeschwindigkeit dieselbe. Dabei wirken aber schwache Felder verhältnismäßig weniger ein als starke. Graphisch ist die Abhängigkeit der an den Drahtenden verbleibenden Spannungsdifferenz vom Magnetfeld durch Fig. 25 veranschaulicht.

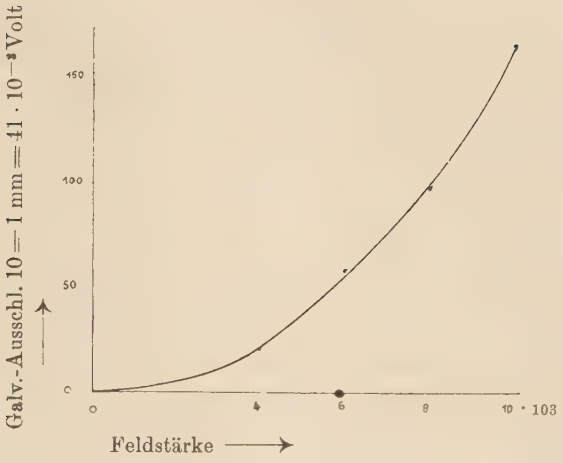


Fig. 25.

Um den Einfluß der Stärke des eingeprägten Stromes auf den Effekt im transversalen Feld kennen zu lernen, wurde ein aus Pulver gepreßtes Wismutdrahtstück mit verschieden starkem Strome beschickt, was durch Veränderung der Anzahl der stromliefernden Akkumulatoren leicht ausgeführt werden konnte. Man fand hier die Abklingungskurven der Tabelle 54.

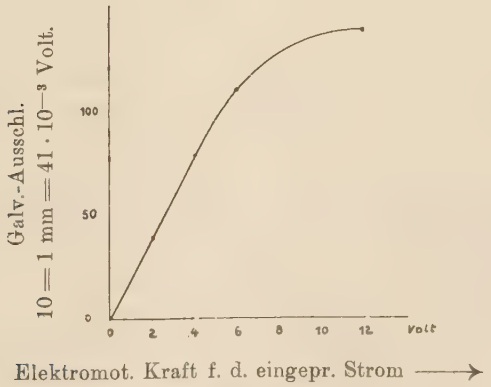


Fig. 26.

Tabelle 54.

Verschiebung des Kontaktes I in Trommelteilen	Galvanometerausschläge bei einer elektromotorischen Kraft für den eingeprägten Strom von 12 Volt	6 Volt	4 Volt	2 Volt
0	Stromausschalten			
20	—138	—110	—78	—39
30	132	110	77	38
40	132	113	76	38
50	130	108	75	37
60	128	107	74	36
80	127	103	72	36
100	124	101	71	35
130	122	98	68	34
180	117	92	67	32
230	110	88	62	31
280	107	84	60	30
380	98	77	52	28
480	84	65	43	22
680	74	54	38	19
880	60	43	30	16
1080	40	28	21	12
1580	30	18	13	—

Widerstand des Wismutdrahtes 2,1 Ohm.
Feldstärke 10000 Gauß.

Hier fand sich bei überall gleich rascher Abklingung die zurückbleibende Spannungsdifferenz bei niederen Stromstärken proportional der Stromstärke, bei stärkeren Strömen wuchs sie langsamer als die Stromstärke. (Vergl. Fig. 26).

Ein Umstand verdient noch besondere Beachtung. Die Abklingungskurven für den Effekt im transversalen Magnetfelde sind bei den Drähten, wo außerhalb des Feldes keine Nachwirkung auftritt, einfach abfallende Kurven ohne ein Maximum. Man muß also das Entstehen des Maximums der Übereinanderlagerung der beiden Effekte, des außerhalb des Feldes und des im transversalen Felde bestehenden, zuschreiben. Das Auf-

treten des Maximums bietet also den Beweis dafür, daß auch im transversalen Magnetfeld der außerhalb des Feldes gefundene Effekt weiterbesteht. Zieht man nun diesen letzten Effekt von der im Magnetfeld beobachteten Kurve ab, so muß der Effekt im transversalen Feld allein übrig bleiben, man müßte also nach den obigen Erfahrungen eine einfache Abklingungskurve erhalten.

Versucht man nun aber, diese Trennung der beiden Effekte an einigen der aufgenommenen Kurven auszuführen, so ergibt sich, daß das Maximum noch nicht verschwindet, wenn man den außerhalb des Feldes gefundenen Betrag der zurückbleibenden elektromotorischen Kraft abzieht. Man erhält erst eine nur abfallende Kurve, wenn man die in Anrechnung zu bringende Abklingungskurve für den Effekt im Feld 0 in einem bestimmten Verhältnis vergrößert. Der Maßstab dieser Vergrößerung wächst mit der Feldstärke, sodaß bei 10000 Gauß ungefähr $^3/_2$ von der im Feld 0 zurückbleibenden elektromotorischen Kraft abzuziehen sind. Demnach wird auch im transversalen Feld der außerhalb des Feldes bestehende Effekt verstärkt und zwar ungefähr im selben Maße, wie im Felde, dessen Kraftlinien parallel der Stromrichtung laufen.

Das Verhalten des Wismutdrahtes im Magnetfeld läßt sich kurz so beschreiben: Der außerhalb des Magnetfeldes bestehende Effekt wird im Felde verstärkt. Außerdem tritt im transversalen Felde ein Effekt von entgegengesetztem Vorzeichen und kleinerer Abklingungsgeschwindigkeit hinzu.

V. Versuch eines theoretischen Zusammenschlusses der Beobachtungsergebnisse.

Die Versuche haben uns gezeigt, daß wir am Wismutdraht zwei von einander verschiedene vom Strom hervorgebrachte Effekte beobachten können, einen ersten, welcher sowohl außerhalb wie innerhalb des Feldes besteht, und einen zweiten, welcher sich über den ebengenannten im transversalen Magnetfeld lagert.

Auf den letzteren wollen wir in diesem Teile der Arbeit nicht näher eingehen; es ist noch zu wenig über ihn bekannt, als daß man eine nur einigermaßen zwingende Erklärung für ihn geben könnte. Nur der erstgenannte Effekt soll darum hier ins Auge gefaßt werden.

Dieser äußert sich nun darin, daß er bei Stromanstieg eine scheinbare Widerstandsverkleinerung im Wismutdraht hervorruft, beim Verschwinden des Stromes aber eine elektromotorische Kraft im Draht zurückbleiben läßt. Für diese elektrische Nachwirkung ergaben sich nun die Gesetze, die in einer Übersicht noch einmal zusammengestellt sein mögen:

Nach dem Stromdurchgang bleibt am Wismutdraht eine rasch abklingende elektromotorische Kraft zurück. Sie hat dasselbe Vorzeichen wie der während des Stromfließens im Draht bestehende Spannungsabfall.

Die Geschwindigkeit des Stromabfalles hat keinen Einfluß auf die elektrische Nachwirkung.

Ein zwischen Stromausschalten und Messung liegender Kurzschluß ist ohne Einfluß auf die beobachtete Nachwirkung.

Nach dem Kurzschluß steigt die Spannung augenblicklich auf ihren Endwert an.

Die Stärke der zurückbleibenden elektromotorischen Kraft ist an demselben Drahtstück proportional der Stärke des eingeprägten Stromes und beträgt bis $1\,^0/_0$ der angelegten Spannung.

An Drähten mit stärker ausgeprägt kristallischer Struktur ist der Effekt größer. Aus feinem Wismutpulver hergestellter Draht und flüssiges Wismut zeigen den Effekt nicht.

Auch wenn im Draht die Kristallachsen überall in derselben Richtung verlaufen, tritt der Effekt auf, doch wurde bei Stromdurchgang parallel den Hauptspaltflächen der Effekt verhältnismäßig klein gefunden.

Pressung des Metalls vermindert die zurückbleibende elektromotorische Kraft.

Die zurückbleibende Spannungsdifferenz nimmt mit sinkender Temperatur ab, bei hohen Temperaturen langsamer, bei tieferen rascher.

Das magnetische Feld verstärkt die zurückbleibende elektromotorische Kraft in allen Lagen des Drahtes zur Kraftlinienrichtung.

Die Abklingungskurve hat nicht die Gestalt einer e^{-Kx}-Kurve, denn die Abklingungsgeschwindigkeit, gemessen durch das Verhältnis zweier in bestimmten Zeitintervallen aufeinander folgender Ordinaten, nimmt bei derselben Abklingungskurve mit der Zeit ab.

Durch verschiedene Stromstärke wird nur der Maßstab der Kurve, nicht ihre Form geändert.

Bei stärker kristallisch ausgebildetem Wismut klingt der Effekt weit langsamer ab als bei Draht aus kleinen Kristalltrümmern.

Durch den Einfluß der Temperatur wird fast nur der Maßstab, die Form der Kurve nur sehr wenig verändert. Bei höheren Temperaturen klingt der Effekt ein wenig langsamer ab als bei tieferen.

Das Magnetfeld verändert nur den Maßstab und nicht die Form der Abklingungskurve.

Wenn nun hier der Versuch gemacht wird, auf Grund der für unseren Effekt geltenden Gesetze ein Bild seiner Entstehung aufzubauen, so kann dies natürlich nicht Anspruch darauf erheben, dem Naturvorgange wirklich zu entsprechen; es hat dies Bild lediglich den Wert einer Arbeitshypothese.

Geht man daran, den oben beschriebenen Effekt durch bekannte Vorgänge zu erklären, so erkennt man zunächst, daß eine ganze Reihe von Erscheinungen ausscheiden. Wegen des Vorzeichens der zurückbleibenden elektromotorischen Kraft und wegen ihrer Unabhängigkeit von der Stromänderungsgeschwindigkeit kann man es mit keiner Induktionswirkung zu tun haben. Irgend welche elektrostatische Aufladung, vielleicht infolge durch die Kristallschichten hervorgerufener Kapazitätserhöhung, kann auch nicht in Betracht kommen, denn dann würde der Kurzschluß stets die Ladung vermindern müssen. Alle durch Wärme hervorgerufenen Erscheinungen fallen weg, da die Abklingungsgeschwindigkeit der Wärmevorgänge über

1000 mal kleiner ist als die des beobachteten Effektes. Es scheiden aus diesem Grunde also aus: Alle auf Peltiereffekten und deren Umkehrung beruhenden Erscheinungen, der sogenannte Thomsoneffekt und auch der v. Ettinghausen-Nernstsche Longitudinaleffekt und Transversaleffekt.[1])

Man könnte nun annehmen, daß man es mit einer piezoelektrischen Erscheinung zu tun habe, denn die piezoelektrischen Vorgänge sind ja reversibel. Während des Stromdurchganges könnten durch das Potentialgefälle in den Wismutkristallen elastische Spannungen hervorgerufen werden, durch deren Aufhebung beim Stromverschwinden piezoelektrische Ladungen auftreten könnten. Hiergegen läßt sich anführen, daß die beobachteten Kurven dann ein Maximum haben müßten, da die Hervorbringung piezoelektrischer Spannungen nur bei Druckänderungen eintritt und die Druckänderung hier vom Moment des Stromausschaltens von Null beginnend auf einen höchsten Wert ansteigen und dann erst abklingen würde. Die Kurven für unseren Effekt zeigen nun aber in dem beobachtbaren Teile kein Maximum, und die Kurven mit langsamer Abklingung weisen darauf hin, daß wir auch in dem sich der Beobachtung entziehenden Teile kein Maximum zu suchen haben. Ganz sonderbar würde aber bei der Annahme piezoelektrischer Ursachen die große Verschiedenheit der Abklingungsgeschwindigkeit an verschiedenen Wismutproben erscheinen müssen, die für die stärker kristallischen Drähte einen viel geringeren Elastizitätsmodul des Wismuts fordern würde als für die anderen.

Die Notwendigkeit stark ausgeprägt kristallischer Struktur für das Auftreten des Effektes, die Einwirkung starken äußeren Druckes und der Einfluß der Lage der Kristallachsen hatten die Vermutung nahegelegt, daß der Sitz der Nachwirkung Schichten geringer Dichte seien, welche in Richtung der Spaltflächen in das Metall eingelagert sind. Es wird darum gut sein, daß wir über die Möglichkeit des Vorhandenseins und die möglichen Eigenschaften solcher Schichten etwas Näheres kennen zu lernen suchen.

---

[1]) A. v. Ettinghausen und W. Nernst, Wied. Ann. **29**, p. 243, 1881.

Nach Beobachtungen von C. Lüdeking[1]) dehnt sich das Wismut im Moment des Erstarrens um $3\,^0/_0$ seines Volumens im flüssigen Zustande aus. Weiterhin zeigte G. Vassura[2]), daß die spez. Leitfähigkeit des Wismuts bei 271° im flüssigen Metall $0{,}781 \cdot 10^4$, beim festen aber bei derselben Temperatur nur $0{,}364 \cdot 10^4$ (Ohm^{-1}) beträgt: der Widerstand des Wismuts vermehrt sich beim Erstarren auf reichlich das Doppelte. Volumenvergrößerung und Widerstandserhöhung gehen Hand in Hand. Man kann also schließen, da das Metall beim Erstarren kristallisch geschichtet wird, daß man die Widerstandsvermehrung in Schichten geringer Dichte, welche sich in Richtung der Spaltflächen einlagern, zu verlegen hat.

Denken wir uns nun einen Würfel von flüssigem Wismut. Wir lassen das Metall erstarren. Dabei wird sich jede Kante des Würfels um $1\,^0/_0$ (Volumenvergrößerung $3\,^0/_0$!) verlängern, der spez. Widerstand des Würfels aber auf mehr als das Doppelte seines ursprünglichen Wertes erhöhen. Nehmen wir nun an, daß die Vermehrung des Widerstandes allein der Einlagerung der volumvergrößernden schlechtleitenden Schichten zuzuschreiben sei, so käme die ganze Widerstandsvermehrung auf $1\,^0/_0$ Längenänderung; die eingesprengten Schichten würden also im Mittel einen ungefähr 50 mal so hohen spezifischen Widerstand haben, als der am festen Wismut beobachtete beträgt. Nun ist dieser eben gefundene Wert, wie schon bemerkt, nur ein Mittelwert, von welchem sich einzelne Schichten sehr weit entfernen werden. Daß nun in derartigen Schichten hohen Widerstandes die Elektrizitätsleitung sich von der gewöhnlichen metallischen Leitung sehr unterscheiden kann, liegt wohl auf der Hand. Es erscheint also nicht mehr so sehr willkürlich, wenn wir den Nachwirkungseffekt in diese Schichten verlegen.

Da die für die Nachwirkung gefundenen Kurven stets reine Abklingungskurven sind und nie ein Maximum oder Minimum aufweisen, so hätten wir anzunehmen, daß in den wirksamen Schichten der vom Stromdurchgang bewirkte

[1]) C. Lüdeking, Wied. Ann. **34**, p. 21, 1888.
[2]) G. Vassura, Cim. (3) **31**, 25 1892.

Spannungsabfall infolge irgendwelcher noch unbekannter Umstände langsamer abklingt als bei der gewöhnlichen metallischen Leitung. Nun zeigt uns das Wismut mit ausgeprägt großzügiger Struktur, wie z. B. das Metall in den Glaskapillaren oder der durch Erwärmen umgewandelte Draht, eine geringere Abklingungsgeschwindigkeit als der aus bunt durcheinander gewürfelten Kristallbrocken bestehende gepreßte Draht. Wir müssen also schließen, daß bei besser ausgebildeter Schichtung der Effekt langsamer abklingt. In ein und derselben Wismutprobe haben wir nun aber die Schichten stets in verschiedenster Weise ausgebildet, sodaß wir darin sowohl welche mit rascherer als auch welche mit langsamerer Abklingung annehmen müssen. Klingt nun in jeder Schicht die Spannung nach dem Gesetze

$$A\, e^{-kt}$$

ab, wobei A den Anfangswert der Spannung bedeutet und k eine für die Schicht charakteristische Konstante ist, so wird die an den Drahtenden beobachtete Abklingungskurve dem Gesetz

$$\Sigma A\, e^{-kt}$$

folgen müssen, wobei A und k in den verschiedenen Gliedern der Summe verschieden sind. Diese Forderung erfüllen auch alle unsere Beobachtungsergebnisse, denn die Abklingungsgeschwindigkeit der Kurven nimmt mit der Zeit stets rascher ab als bei einer reinen $e^{-\alpha x}$-Funktion.

Der Betrag der zurückbleibenden elektromotorischen Kraft hängt offenbar außer mit der Abklingungsgeschwindigkeit in den wirksamen Schichten auch mit der Anzahl der letzteren zusammen, oder genauer, mit dem Gesamtspannungsabfall, welcher während des Stromfließens auf diese Schichten kommt. Aus der Abklingungskurve muß sich nun rückwärts auf diesen Gesamtspannungsabfall schließen lassen. Wir wählen als Beispiel den Draht, welcher den größten Effekt aufweist, den durch Erhitzen umgewandelten Hartmann und Braunschen Draht. Durch graphische Extrapolation kann man aus der Abklingungskurve annähernd den Wert der Spannungsdifferenz bestimmen, welche während des Stromfließens auf die $50 \cdot 19 \cdot 10^{-7}$ Sek.

nach dem Stromausschalten hauptsächlich noch wirkenden Schichten entfiel. Man erhält ungefähr den Wert 230 in Galvanometerausschlägen, was 0,09 Volt entspricht. Auf den ganzen Draht kamen während des Stromfließens 8 Volt, auf die eingesprengten Schichten also annähernd 4 Volt. Von den wirksamen Schichten wird demnach nur $2\,^0/_0$ des Gesamtspannungsabfalles in allen Schichten, also auch des Gesamtwiderstandes der sämtlichen Schichten aufgenommen. Dies steht in gutem Einklange mit der Forderung, daß nur eine sehr geringe Anzahl der Schichten, nur die mit besonders abweichend hohen Widerständen, hier in Betracht kommen.

Wir wollen nun den Einfluß des Magnetfeldes ins Auge fassen. Vom transversalen Feld müssen wir hier absehen, da dessen Einwirkung auf unseren Effekt wegen der Überlagerung des im transversalen Feld auftretenden anderen Effektes nur schätzungsweise angebbar ist.

Das Feld mit Kraftlinien parallel der Drahtrichtung bewirkte eine Verstärkung der Nachwirkung, welche, was sehr beachtenswert ist, sehr nahe proportional der Feldstärke war. Demnach erfolgte hier die Einwirkung auf den Effekt selbst oder dessen nächste Ursachen. Um zu erkennen, wie eine solche Einwirkung zustande kommen kann, müssen wir uns vor Augen führen, welche Eigenschaften des Wismuts in einem wie hier orientierten Magnetfeld geändert werden. Nun wirkt ein Magnetfeld auf den Widerstand des Wismuts in allen Lagen vergrößernd ein. G. Berndt[1]) in Cöthen konnte zeigen, daß diese Widerstandsänderung am flüssigen Wismut nicht besteht. Also hängt sie mit den Eigentümlichkeiten des festen Metalles zusammen. Eine Veränderung im Gefüge oder in der Richtung kleinster Teilchen kann man aber schwerlich als Ursache annehmen, denn Paul Pallme-König wies nach, daß die Widerstandsänderung bis auf $4 \cdot 10^{-6}$ sek. eine augenblickliche ist. Dies Ergebnis ist allerdings nur für transversales Feld gewonnen worden, doch man darf es wohl ohne Bedenken auf die Ein-

[1]) G. Berndt, Drudes Ann. **23**, p. 932, 1907; Phys. Zeitschr. **8**, p. 778, 1907.

wirkung eines beliebig gerichteten Magnetfeldes übertragen. Man könnte nun vielleicht die Widerstandserhöhung durch eine Krümmung, also eine Verlängerung der Strombahn erklären und diesen Vorgang, da er am flüssigen Wismut nicht zu beobachten ist, in die schlecht leitenden Schichten verlegen. Für die Annahme, daß diese letzteren der Ort der Widerstandserhöhung sind, sprechen auch Versuche Righis[1]), nach denen die Einwirkung des Feldes auf den Widerstand bei gepreßtem und hartem Wismut weniger stark eintritt, als bei dem gewöhnlichen, denn gepreßtes und hartes Wismut wird weniger schlecht leitende Schichten aufzuweisen haben.

Es erfolgte nun die Widerstandserhöhung am Hartmann und Braunschen Wismutdraht im Magnetfeld (Kraftlinien parallel der Drahtrichtung) wie gewöhnlich fast proportional der Feldstärke und in dem Maße, daß der Widerstand von 2,74 Ohm auf 3,44 Ohm wuchs, wenn das Feld von 0 auf 10000 CGS anstieg. Da wir auf die eingesprengten Schichten den halben Widerstand des festen Wismuts zu rechnen haben, so würde, bei Verlegung der gesamten Widerstandsänderung in die Schichten, sich der Widerstand der letzteren im Feld 10000 CGS um 51% erhöht haben. Da bei unseren Beobachtungen stets dieselbe Stromstärke herrschte, mußte der auf die Schichten entfallende Spannungsabfall in demselben Maße sich vergrößern wie der Widerstand der Schichten, unser Effekt mußte sich demnach im gleichen Verhältnis wie der Widerstand in den wirksamen Schichten erhöhen. In der Tat zeigen nun unsere Beobachtungen eine Verstärkung der Nachwirkung, welche der Widerstandserhöhung proportional folgt, und welche im Feld 10000 CGS an dem oben angeführten Drahte 58% betrug (Galvanometerausschläge: im Feld 0 203, im Feld 10000 129). An einem durch Erwärmen umgewandelten Hartmann und Braunschen Draht belief sich die Widerstandserhöhung im Felde 10000 auf 26%, also kam auf die Schichten eine Widerstandsänderung um 52%; die Nachwirkung erhöhte sich dabei um 73%. Es zeigt sich also auch hier

[1]) Righi, J. d. Phys. (2), **3**, 355, 1894; Beiblätter **8**, 858, 1884.

noch einigermaßen Übereinstimmung, denn man darf sicher annehmen, daß nicht alle Schichten gleichmäßig an der Widerstandserhöhung beteiligt sein werden, sondern daß die Ablenkung der Strombahn in den besser ausgebildeten Schichten stärker erfolgt als in den anderen. Dieser Unterschied wird sich natürlich, je ausgeprägter die kristallische Struktur ist, um so stärker geltend machen.

Wenn wir nun die hier geschilderte Hypothese über die Widerstandsänderung des Wismuts annehmen wollen, so haben wir sofort auch eine Erklärung dafür, warum sich der Widerstand im transversalen Feld mehr erhöht als im Feld, dessen Kraftlinien der Drahtrichtung parallel sind. Eine Einwirkung auf die Strombahn kann ja nur stattfinden, wenn Stromrichtung und Kraftlinienrichtung nicht parallel sind. Diese Forderung wird aber in dem inhomogenen Wismut erfüllt sein, auch wenn Drahtrichtung und Kraftlinienrichtung zusammenfallen; der Strom wird nie genau in Richtung der Kraftlinien fließen. Im transversalen Feld werden nun natürlich weit mehr Stromlinien den Kraftlinien nicht parallel laufen als in jedem anderen Feld. Es wird so erklärlich, warum das Feld in allen Lagen den Widerstand vergrößert, als transversales Feld aber am stärksten einwirkt.

Wie stellt sich nun unsere Annahme über den Sitz der Nachwirkung der Einwirkung der Temperatur gegenüber? Die Beobachtungsergebnisse zeigen, daß der Betrag des Effektes von der Temperatur nicht linear abhängt; bei höheren Temperaturen sinkt er sehr langsam mit abnehmender Temperatur, bei tieferen rascher. Außerdem ist die Temperatureinwirkung bei verschieden ausgeprägt kristallischem Metall quantitativ verschieden. Es spielen also offenbar hier sehr verwickelte Vorgänge sich ab, wie es ja bei einem inhomogenen Körper nicht anders zu erwarten ist.

Der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes beträgt nun bei Wismut $4{,}2 \cdot 10^{-3}$, also ein wenig mehr als bei den meisten anderen reinen Metallen, wo er $3{,}6 \cdot 10^{-3}$ bis $4{,}1 \cdot 10^{-3}$ ist. Wenn wir unsere Annahme der eingesprengten

Schichten aufrecht erhalten wollen, müssen wir fordern, daß der Temperaturkoeffizient dieser Schichten nicht sehr von $4{,}2 \cdot 10^{-3}$ abweicht, denn wir können nicht annehmen, daß der Temperaturkoeffizient des schichtenlosen Wismuts sich von $4{,}0 \cdot 10^{-3}$ sehr unterscheidet, da ja die meisten Metalle einen in dieser Gegend liegenden Wert aufweisen. Wenn nun die Temperatur sich erhöht oder erniedrigt, so wird sich die Nachwirkung gemäß der Widerstandsänderung in den wirksamen Schichten vergrößern oder verkleinern, da wir ja immer gleiche Stromstärke haben. In dem Bereich der linearen Abhängigkeit des Effektes von der Temperatur zeigt sich diese Forderung auch annähernd erfüllt. Fiel die Temperatur von —9° auf —65°, so sank der Widerstand von 3,55 Ohm auf 2,64 Ohm, also um 23%, während der Effekt sich von 70 auf 48, also um 31% verringerte. Was nun aber das Verhalten des Nachwirkungseffektes bei den Temperaturen über 20° anbelangt, so würde dies verlangen, daß der auf die wirksamen Schichten kommende Spannungsabfall sich bei Temperaturänderungen in diesem Gebiet nicht vergrößerte. Dies scheint in Widerspruch zu stehen mit der beobachteten normalen Vergrößerung des Widerstandes bei Temperaturerhöhung in diesem Gebiet. Da nun aber die auf die wirksamen Schichten entfallende Potentialdifferenz höchstens 1% der auf den ganzen Draht kommenden beträgt, so würde eine solche Unregelmäßigkeit in den wirksamen Schichten am Temperaturkoeffizienten des ganzen Drahtes sich nur sehr wenig geltend machen. Mithin steht das Verhalten der Nachwirkung nicht in Widerspruch mit der am Wismutdraht beobachteten gesamten Widerstandsänderung.

Es ist nun die Frage zu beantworten: Wie hat man sich das verhältnismäßig langsame Abklingen der elektrischen Spannung in den Schichten geringer Leitfähigkeit zu erklären?

Man könnte annehmen, die Schichten seien verhältnismäßig weit, hätten Weiten von vielleicht einigen Tausendstel mm und es sei in ihnen Gas eingeschlossen. Beim Fließen des Stromes müßte dann in den schlecht leitenden Schichten ein sehr starkes Potentialgefälle auftreten, durch welches das Gas ionisiert werden

könnte. Positive Ionen würden sich in der Nähe der schichtbegrenzenden Metallfläche ansammeln, durch welche der negative Strom eintritt, negative Ionen an der gegenüberliegenden Fläche. Wenn nun der Strom ausgeschaltet wird, verschwindet die ionisierende Spannung, aber die Ionen werden sich nicht sofort neutralisieren. Es wird das Gas noch eine kurze Zeit lang elektrisch polarisiert bleiben. Dadurch werden aber in den metallischen Begrenzungsflächen elektrische Spannungen influenziert, welche mit den während des Stromfließens bestehenden das gleiche Vorzeichen haben. Die nun im Gas eintretende Molisierung könnte ein solches Abklingen der Spannung, wie wir es beobachteten, bewirken. Es liegen allerdings die für die Molisierung gefundenen Abklingungszeiten in anderen Größenordnungen, in den Ganzen der Sekunden. Aber in unseren Schichten sind die Verhältnisse wesentlich andere als in einem großen Gasquantum, und an solchen sind die Beobachtungen über das Verschwinden der Ionisation nur angestellt worden. Während dort die Zusammenstöße in der Hauptsache nur zwischen den einzelnen Ionen oder zwischen Ionen und Molekülen erfolgen, werden hier eine sehr große Zahl von Ionen auf die metallischen Grenzflächen der Schicht aufprallen. Da aber diese Metallfläche bei weitem dichter ist als eine Gasschicht, so wird die Zahl der Zusammenstöße wesentlich größer sein als im großen Gasquantum. Außerdem muß das in der Schicht vorhandene starke Potentialgefälle eine sehr hohe Ionengeschwindigkeit hervorrufen. Fraglich ist aber, ob in einem so kleinen Gasvolumen, wie es die Schichten bieten würden, so viele Ionen entstehen können, wie die Erklärung unseres Effektes es verlangt.

Eine weitere Annahme für das Entstehen der langsamen Abklingung in den Schichten wäre die folgende: Der Widerstand in diesen Schichten wäre so groß, daß die Leitung erfolgte wie in einem Medium mit Dielektrizitätskonstante und sehr geringem Leitvermögen. Es ist nun von Maxwell für das Abklingen der Dichte der freien Elektrizität in einem solchen Medium die Gleichung aufgestellt worden:

$$\varrho = \varrho_0 e^{-\frac{4\pi t}{r\varepsilon}}$$

(ϱ = Dichte der freien Elektrizität, r = spezifischer Widerstand, ε = Dielektrizitätskonstante). Die Anwendbarkeit dieser Gleichung ist nun hier sehr fraglich, denn abgesehen davon, daß man nicht weiß, welchen Wert man für die Dielektrizitätskonstante in den Schichten einsetzen soll, ist es sehr zweifelhaft, ob in solch engen Schichten, wie wir sie annehmen müssen, die gewöhnlichen Gesetze noch gelten, auf welche sich die Gleichung stützt. Sicher verliert dort schon die Dielektrizitätskonstante, vielleicht auch der Widerstand, seine gewöhnliche Bedeutung. Es kann uns also nicht wundernehmen, wenn sich die Beobachtungsergebnisse mit der Gleichung schlecht in Einklang bringen lassen.

In der Tat verlangt nun die Gleichung, wenn sie Abklingungen von der Langsamkeit darstellen soll, wie sie bei unseren Versuchen zu beobachten waren, Werte für εr, die wir unter unseren Verhältnissen nicht gut annehmen können. Wählen wir einmal den Draht mit der langsamsten Abklingung als Beispiel, den durch Erwärmen umgewandelten Hartmann und Braunschen Draht. In $4 \cdot 10^{-4}$ Sek. sank dort der Effekt auf die Hälfte seines Wertes herab. Wir hätten also zu setzen:

$$\frac{1}{2} = e^{-\frac{4\pi}{r \cdot \varepsilon} \cdot 4 \cdot 10^{-4}},$$

woraus folgen würde

$$\frac{4\pi}{r\varepsilon} \cdot 4 \cdot 10^{-4} \text{ annähernd} = 1,$$

$$r \cdot \varepsilon \text{ annähernd} = 5 \cdot 10^{-3}.$$

Bezeichnen wir nun mit r_0 den am festen Wismut gewöhnlich beobachteten spezifischen Widerstand und mit αr_0, den spezifischen Widerstand in den wirksamen Schichten, so würde folgen

$$\alpha r_0 \cdot \varepsilon \text{ annähernd} = 5 \cdot 10^{-3}.$$

Es ist aber in Gaußschem Maß gemessen

$$r_0 = 1{,}3 \cdot 10^{-16}$$

und demnach

$$\alpha \varepsilon \cdot 1{,}3 \cdot 10^{-16} \text{ annähernd} = 5 \cdot 10^{-3}$$

$$\alpha \varepsilon \text{ annähernd} = 4 \cdot 10^{13}.$$

Nun unterliegt aber a einer Beschränkung: Wenn unsere Gleichung anwendbar bleiben soll, muß wegen der Bedeutung von ε die Schichtbreite (senkrecht zur Schichtebene, also in Richtung des Stromes gemessen) zum mindesten größer als der Moleküldurchmesser sein. Sie darf also nicht unter 10^{-7} cm sinken. Für den Gesamtwiderstand w der wirksamen Schichten gilt demnach, wenn N die Anzahl der Schichten ist

$$w > N \cdot 10^{-7} \frac{r_0 a}{q} \quad \begin{matrix} (q = \text{Querschnitt der Schichten}) \\ (q = \quad \text{„} \quad \text{des Drahtes}). \end{matrix}$$

Bei einem gewöhnlichen Wismutdraht von 1 m Länge und demselben Querschnitt q ist der Widerstand:

$$100 \frac{r_0}{q}.$$

Der Gesamtwiderstand der wirksamen Schichten beträgt nun $1\,\%$ dieses Widerstandes (S. 106), also

$$w = \frac{r_0}{q}.$$

Es muß also sein

$$\frac{r_0}{q} > N \cdot 10^{-7} \frac{r_0 a}{q}$$

$$a < \frac{10^{+7}}{N},$$

oder, da $N \geqq 1$

$$a < 10^7.$$

a darf also den Wert 10^7 nicht überschreiten, wenn unsere Gleichung nicht allen Sinn verlieren soll. Damit nun aber bei $a \leqq 10^7$ $a \cdot \varepsilon = 10^{13}$ wird, müssen wir für ε mindestens 10^6 annehmen; ob man dazu aber berechtigt ist, darf man wohl bezweifeln.

Man könnte nun die hier für a gezogenen Grenzen etwas erweitern und dürfte dann für ε kleinere, also wahrscheinlichere, Werte einsetzen, wenn man sich die Schichten so vorstellte, daß in ihnen neben den ganz schlecht leitenden Teilen auch noch Überbrückungen von geringerem Widerstande beständen, sodaß für den Gesamtwiderstand jeder Schicht hauptsächlich

diese Überbrückungen ausschlaggebend wären, während die Nachwirkung in den ganz schlecht leitenden Teilen erzeugt würde.

Aber selbst wenn sich dieser Ausweg nicht geboten hätte dürfte man doch allein wegen der Unstimmigkeit mit obiger Gleichung die Annahme einer Art dielektrischer Polarisation als Ursache für unseren Effekt nicht ohne weiteres von der Hand weisen, denn, wie schon oben bemerkt, ist es sehr fraglich, ob die besagte Gleichung das Abklingen der freien Elektrizität in den engen Schichten überhaupt darstellt. Weiterhin sind aber auch die Eigenschaften der Dielektrika noch nicht so weit erforscht, — es sei nur an das Residuum der Leydener Flasche erinnert —, daß man behaupten könnte, die Maxwellsche Gleichung müsse in allen Fällen das Verschwinden der elektrischen Spannung Dielektrikum widergeben. Sicher wäre aber unsere Nachwirkung durch Zurückführung auf eine Art von dielektrischer Polarisation am zwanglosesten erklärt.

Die Versuche zu vorliegender Arbeit sind im theoretisch-physikalischen Institut der Universität Leipzig ausgeführt worden. Es ist mir eine gern erfüllte Pflicht, dem Direktor des Institutes, Herrn Prof. Dr. Th. Des Coudres, von welchem ich auch die Anregung zu dieser Arbeit erhielt, für das rege Interesse zu danken, mit dem er die Arbeit gefördert hat, insbesondere auch für die Liebenswürdigkeit, mit der er die erforderlichen Apparate und sonstigen Hilfsmittel mir zur Verfügung gestellt hat.

Lebenslauf.

Ernst Richard Seidler, ev. luth. Konfession, wurde am 15. März 1886 in Bautzen als Sohn des Kaufmanns Paul Seidler geboren. Er besuchte von Ostern 1896 bis Ostern 1902 die Realschule seiner Vaterstadt und trat dann in die Obersekunda des Realgymnasiums zu Zittau ein, welches er Ostern 1905 mit dem Zeugnis der Reife verließ. Von Ostern 1905 bis Ostern 1907 widmete er sich dem Studium der Mathematik und Physik an der Technischen Hochschule in Dresden, und von Ostern 1907 ab setzte er seine Studien an der Universität Leipzig fort. Er besuchte die Vorlesungen und Übungen folgender Herren Dozenten:

In Dresden: Helm, Krause, Disteli, Grübler, Hallwachs, Töpler, Pattenhausen, Naetsch, Hempel, Schultze, Stern.

In Leipzig: Hölder, Rohn, Neumann, Des Coudres, Marx, Fredenhagen, Wundt, Volkelt, Jungmann, Barth, Lehmann, Wagner.